

Научная статья

УДК 669.715:669.018.62

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-123-132

ФТОРСОДЕРЖАЩИЕ ПОЛИМЕРЫ ДЛЯ ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.С. Сердцелюбова¹, Т.Я. Ошмарина¹, Ю.К. Зверевич¹

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

Аннотация. Рассмотрены фторсодержащие полимерные пленкообразующие как один из классов химических соединений, применяемых в технологии получения защитных покрытий, а также в других промышленных отраслях. Проведен анализ рынка фторполимеров в России и за рубежом, а также оценка развития данных полимеров в нашей стране. Представлены особенности химической структуры фторсодержащих сополимеров, а также их модификаций. Выявлены основные преимущества фторированных пленкообразующих, раскрыты области их применения.

Ключевые слова: защитные покрытия, фторполимеры, авиационные покрытия, пленкообразующие системы, высокомолекулярные соединения, лакокрасочные материалы

Для цитирования: Сердцелюбова А.С., Ошмарина Т.Я., Зверевич Ю.К. Фторсодержащие полимеры для защитно-декоративных покрытий промышленного назначения // Труды ВИАМ. 2025. № 10 (152). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-123-132.

Scientific article

FLUORINE-CONTAINING POLYMERS FOR PROTECTIVE AND DECORATIVE COATINGS FOR INDUSTRIAL USE

A.S. Serdtselyubova¹, T.Ya. Oshmarina¹, Yu.K. Zverevich¹

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 considers fluorine-containing polymer film-forming agents used in protective coatings and other industrial sectors. The paper provides the results of an analysis of the fluoropolymer market in Russia and abroad, as well as an assessment of the development of these polymers in our country. The features of the chemical structure of fluorine-containing copolymers and their modifications are described. The main advantages of fluorinated film-forming agents and the areas of their application are identified.

Keywords: protective coatings, fluoropolymers, aviation coatings, film-forming systems, high molecular weight compounds, paint and varnishes

For citation: Serdtselyubova A.S., Oshmarina T.Ya., Zverevich Yu.K. Fluorine-containing polymers for protective and decorative coatings for industrial use. *Trudy VIAM*, 2025, no. 10 (152), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-123-132.

Введение

В настоящее время при разработке новых функциональных материалов, в том числе лакокрасочных материалов и покрытий, проблема поиска новых решений обусловлена возрастающими требованиями к промышленной продукции и изделиям отечественного производства для различных отраслей техники [1–3]. Для увеличения срока службы современных летательных аппаратов наиболее актуально и доступно применение защитных полимерных покрытий, эксплуатируемых при воздействии множественных внешних факторов: климатических, коррозионных, механических, а также биологических [4–6]. Наличие лакокрасочных покрытий и комплекс их защитных свойств оказывают огромное влияние на повышение стойкости конструкционных материалов как металлических, так и полимерных. В свою очередь, свойства и характеристики покрытий определяются главным образом природой пленкообразующей среды [7, 8].

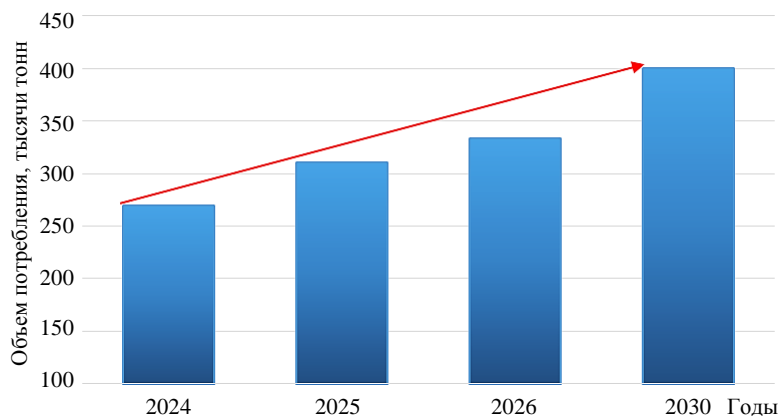
В данный период времени все большее практическое применение приобретают фторполимеры и их модификации, которые являются одними из самых популярных и широко используемых категорий полимеров в лакокрасочной промышленности [9]. Проблемы, возникающие при использовании фторполимеров, связаны в основном с высокой стоимостью их производства и сложностью применения. Однако благодаря своим уникальным свойствам, фторполимеры остаются востребованными на рынке лакокрасочных материалов.

Фторполимеры представляют собой высокотехнологичные материалы, обладающие уникальными свойствами и демонстрирующие растущий спрос в авиационной промышленности. Различные детали и узлы воздушных судов, такие как двигатели, роторы, лопасти, обтекатели, работоспособны при наличии специальных износостойких покрытий, устойчивых к высоким термическим воздействиям [10, 11]. Именно в подобных покрытиях наиболее эффективно используются уникальные, присущие фторполимерам защитные свойства при минимальном содержании исходного фторопласта [12].

Во многих отраслях фторполимеры находят широкое применение в качестве составляющих компонентов термо- и химически стойких, гидрофобных, трибологических, электроизоляционных и биоинертных материалов. Они используются при получении покрытий для металлических изделий, а также пластиков. В технологии лакокрасочных покрытий фторполимеры применяются в качестве модификатора для придания гидрофобных свойств. Вместе с тем большинство фторполимеров являются нерастворимыми, а их высокие температуры плавления и вязкости расплавов обуславливают ряд технологических особенностей при получении покрытий на их основе [13].

Основные преимущества фторполимерных пленок – высокая стойкость к химическим реагентам, термостойкость, повышенная адгезия, электрические характеристики, хорошие физико-механические свойства, в том числе абразивостойкость, а также исключительные гидрофобность и биоинертность – обусловлены сочетанием особенностей химического строения и наноструктуры [14]. Эти свойства делают их идеальными для использования в изделиях, эксплуатируемых в условиях высокой температуры, агрессивной среды и интенсивного трения.

По данным аналитического издательства PlastInfo, ожидается, что среднегодовой темп роста объема потребления фторполимеров на мировом рынке для лакокрасочной промышленности составит приблизительно 6–8 % в год до 2030 г. (см. рисунок). Такой рост обусловлен увеличением спроса на высококачественные и долговечные лакокрасочные материалы, а также появлением новых технологий и материалов.



Среднегодовой рост объема потребления фторполимерных пленок

Основным используемым фторсодержащим полимером остается политетрафторэтилен (ПТФЭ), доля которого в мировом производстве доходит до 80 % [15]. Второй по объему производства фторполимер – поливинилиденфторид (ПВДФ) [16]. Всего в мире производится несколько десятков различных фторполимеров [17, 18].

Особенности химического строения

В истории развития фторполимеров следует обозначить период 1930-х–1940-х гг. В то время исследователями компании DuPont (США) был открыт основной вид данного класса соединений – политетрафторэтилен. Следует отметить, что и в России практически в это же время начали развивать направления исследований и технологий производства фторированных полимеров.

В настоящее время создано более тридцати видов фторполимеров и более ста их промышленных марок. Фторсодержащие полимеры можно классифицировать в зависимости от их химического состава и свойств.

По химическому строению продукты фторполимерного синтеза классифицируются двумя категориями – частично и полностью фторированные полимеры.

К первым можно отнести поливинилиденфторид (ПВДФ), сополимер тетрафторэтилена с этиленом (ЭТФЭ), политрифторхлорэтилен (ПТФХЭ), сополимер трифторхлорэтилена с винилиденфторидом (ПТФХЭ-ВДФ) и другие. Ко вторым, помимо политетрафторэтилена, примыкают сополимер тетрафторэтилена с перфтор(алкилвиниловыми) эфирами или ПФА [19], сополимер тетрафторэтилена с полифторметилвинилэтиленом или МФА и сополимер тетрафторэтилена с гексафторпропиленом или ФЭП.

Рассмотрим некоторые из наиболее распространенных и широко используемых представителей класса фторсодержащих полимеров.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ)

Относится к базовым компонентам большинства композиций благодаря такому ценному и исключительно уникальному набору свойств, как термостойкость в широком эксплуатационном температурном интервале – от 4 до 530 К; рекордно низкий коэффициент трения, благодаря которому полимер внесен в «Книгу рекордов Гиннеса» как самый скользкий материал [20]; химическая стойкость к широкому спектру агрессивных сред. В то же время у него устойчивая биоинертность, атмосферостойкость и прекрасные электроизоляционные свойства. Вышеперечисленные характеристики ПТФЭ определяют многообразие областей его применения: авиакосмический военно-промышленный комплекс, транспортная промышленность, атомная энергетика, электротехника и микроэлектроника, а также химическая промышленность и медицина.

Следует отметить, что уникальность свойств ПТФЭ обусловлена особенностями его молекулярного строения. За счет небольшого размера, атомы фтора образуют плотную оболочку вокруг углеродной цепи, экранируя ее таким образом δ -зарядами и предохраняя фторполимер от внешних воздействий. Это также объясняется высокими показателями энергии диссоциации связи C–F (~450 кДж/моль), что в свою очередь определяет высокие значения температуры разложения (~400 °С). Это приводит к таким очевидным недостаткам, как плохая растворимость и ограниченность возможностей применения для создания лакокрасочных композиций.

Поливинилфторид (ПВФ)

Это кристаллический полимер, температура плавления которого составляет 220–230 °С, а температура начала разложения на воздухе 170 °С [21].

При получении покрытий из ПВФ используют преимущественно порошки с размером частиц не более 0,4 мм, в которые вводят различные добавки методом сухого смешения для улучшения сыпучести. Особенно важным компонентом при составлении композиции является пластификатор, который способствует наиболее полному растеканию и коалесценции частиц. В качестве пластификатора применяют имиды малеиновой кислоты, эфиры фталевой кислоты, триэтилфосфат и другие. Наносят составы на основе ПВФ методами электростатического и струйного распыления, а также нередко в аппаратах кипящего слоя. Технологический процесс получения покрытий на установке кипящего слоя имеет свои особенности [22]. Показатели процесса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели технологического процесса получения покрытий на основе ПВФ

| Показатель | Значения показателей |
|---|-------------------------|
| Температура предварительного нагрева изделия (первичный нагрев), °С | 320–330 |
| Продолжительность выдержки в кипящем слое, с | 20–50 |
| Температура формирования покрытия (дополнительный нагрев), °С | 320–330 |
| Продолжительность формирования покрытия, мин | 10–40 |
| Режим охлаждения покрытия | Закалка в холодной воде |
| Количество наносимых слоев | 1 |
| Толщина покрытия, мкм | 100–400 |

Покрытия обладают хорошими механическими свойствами, однако имеют недостаточную адгезию к металлам.

Поливинилиденфторид (ПВДФ)

Явным преимуществом данного фторполимера является его низкая стоимость наряду с такими достоинствами, как превосходная атмосферостойкость и одновременно высокий коэффициент светопропускания. По сравнению с ПТФЭ, ПВДФ достаточно хорошо растворяется в органических растворителях и поддается механической обработке, что делает его незаменимым компонентом при составлении лакокрасочных материалов. Однако несмотря на широкий спектр достоинств, покрытия на основе ПВДФ обладают невысокой адгезионной прочностью, в связи с чем используется не индивидуальный полимер, а его модификации и сополимеры с тетрафторэтиленом (марка Ф-2МЭ) и другими мономерами (марки Ф-2МБ и Ф-2БА), что позволяет снизить температуру плавления и улучшить растекаемость расплавов.

Известен способ применения покрытий на основе ПВДФ в технологии *coal coating* (окрашивание металлических листов рулонного проката), поскольку по сравнению с традиционным пневматическим нанесением данный метод позволяет наиболее точно контролировать толщину получаемого покрытия.

Сополимер трифторхлорэтилена (ТФХЭ) и тетрафторэтилена (ТФЭ)

В отличие от полимеров ТФХЭ и ТФЭ по отдельности, их сополимеры с этиленфторидом (марки Ф-32Л и Ф-42), ТФЭ с этиленом (марка Ф-40ДП) и гексафторпропиленом (марки Ф-4МБ, Ф-4МВ), другими фторированными соединениями (марки Ф-10, Ф-50, Ф-100) обладают хорошей растворимостью и растекаемостью расплавов, а значит, являются предпочтительными при выборе в качестве пленкообразователей.

Известно, что разработанная порошковая краска марки ПФП-71 на основе фторсополимера Ф-32Л с улучшенными технологическими характеристиками, в рецептуру которой входит также небольшое количество модификаторов (агенты сыпучести, адгезивы и др.), а также материалы на основе сополимера Ф-50П образуют покрытие с высокими показателями адгезионной прочности, что является определяющим фактором при выборе фторсодержащего полимера для составления композиции лакокрасочного материала, поскольку первоначально все фторполиолефины лишены этого важного качества. Немаловажным фактором, оказывающим влияние на адгезионную прочность фторполимера к подложке, является степень его кристалличности. Чем выше содержание аморфной фазы в полимере, тем лучше будет адгезия лакокрасочного материала к окрашиваемому субстрату [23].

Следует упомянуть, что последние двадцать лет велись исследования преимущественно в направлении модифицирования различными способами существующих полимеров для получения уникальных материалов – например, создание ультра- и нанодисперсных порошковых, волокнистых материалов, а также разработка жидких и гелеобразных продуктов, содержащих фторсодержащие олигомеры [24].

Производители

Мировой рынок фторсодержащих полимеров достаточно обширен и насыщен. В данный момент крупнейшими производителями фторполимеров являются такие компании, как DuPont, Pennwalt Chemical, AGC Chemicals и PPG (США); Dongyue, 3M (Dyneon) и Gujarat (Индия); Solvay (Бельгия); Produits Chimiques Ugine Kuhlmann (Франция); Precision Polimer Engineering Ltd (Италия); Daikin, Shanghai 3F, Juhua и Lichang (Китай); Дайкин Коге (Япония). Большую долю рынка, согласно существующей статистике, занимают американские компании. Однако исходя из текущей политической ситуации в мире, наибольший интерес для нас представляют азиатские производители, а именно – китайские и индийские.

В настоящее время в России синтез фторполимерных продуктов сконцентрирован на производственных мощностях таких заводов, как ООО «Завод полимеров Кирово-Чепецкого химического комбината им. Б.П. Константинова» (г. Кирово-Чепецк) и ОАО «Галоген» (г. Пермь), входящих в один холдинг «Галополимер», а также ПАО «Сибур Холдинг». Суммарный объем производства фторполимеров составляет десятки тысяч тонн в год, а ассортимент продуктов и изделий достаточно широкий, однако существенно уступает основным зарубежным производителям [25, 26]. Перспективы развития производства фторполимеров в России достаточно оптимистичные, поскольку спрос на эти материалы постоянно растет. Кроме того, необходимо отметить, что в текущей мировой политической ситуации особое значение приобретает расширение отечественной сырьевой базы, которая обеспечивала бы конкурентоспособность отечественной авиатехники и многих других отраслей.

Практическое применение

В целом в химической промышленности широкое применение нашли различные марки фторполимеров (табл. 2) [27–30].

Таблица 2

Применение фторполимеров

| Марка продукта | Наименование и описание продукта | Применение фторполимера |
|----------------|--|---|
| Ф-1 | Поливинилфторид | Наружные и внутренние покрытия слоистых пластиков и асбестовых изделий, а также барьерная защита солнечных панелей. В судостроении для покрытий изделий из меди, латуни, стали и алюминия |
| Ф-2 | Поливинилиденфторид | Покрытия для трубопроводов, вентиляционных систем, листовых и пленочных материалов, взаимодействующих с агрессивными средами |
| Ф-3 | Политрифторхлорэтилен | В качестве диэлектрика в технике сильных токов, а также для изготовления смотровых стекол, работающих в агрессивных средах |
| Ф-4 | Политетрафторэтилен | Детали уплотнительного и антифрикционного назначения |
| Ф-4PM | Радиационно-модифицированный политетрафторэтилен | Покрытия конденсаторов, а также электроизоляционные покрытия |
| Ф-4Д | Продукт полимеризации тетрафторэтилена в водной среде | Уплотнительные материалы, стойкие к агрессивным средам и работающие при повышенных температурах |
| Ф-4НТД | Низкомолекулярный тонкодисперсный фторопласт | Смазочные материалы, загустители масел |
| Ф-4КС2 | Политетрафторэтилен с наполнением 2 % кобальта синего | Уплотнительные устройства гидроагрегатов пассажирских самолетов |
| Ф-4К20 | Политетрафторэтилен с наполнением 20 % литейного кокса марки КЛ-1 | Высокоэффективные антифрикционные детали, работающие при высоких скоростях скольжения и малых удельных нагрузках |
| Ф-4К15УВ5 | Политетрафторэтилен с наполнением 15 % кокса + 5 % углеродного волокна | |
| Ф-4С15 | Политетрафторэтилен с наполнением 15 % стекловолокна | Уплотнительные манжеты для деталей топливных насосов |
| Ф-40ЛД | Сополимер тетрафторэтилена и этилена | Авиационное топливо, масла и жидкости для гидросистем, хомуты, кронштейны |
| Ф-32Л | Сополимер трифторхлорэтилена и фтористого винилидена | Лакокрасочные материалы и химически стойкие лакокрасочные покрытия |
| СКФ-26 | Каучукоподобный сополимер винилиденфторида и гексафторпропилена | Резинотехнические изделия, устойчивые к агрессивным средам, износостойкие лакокрасочные покрытия |
| Lumiflon | Сополимер фторэтилена и винилового эфира | Атмосферостойкие лакокрасочные покрытия |
| SQ-408-A | Перфторированный этиленпропилен | Изоляция электротехнических изделий и коммуникационных сетей, антиадгезионные покрытия и антикоррозионные агенты |

В лакокрасочной промышленности благодаря отличным влагозащитным, антикоррозионным, диэлектрическим и оптическим свойствам распространение и широкое применение получили фторопласт Ф-32ЛН и эластичный высокомолекулярный сополимер винилиденфторида и гексафторпропилена марки СКФ-26, обладающий уникальными свойствами, включая высокую термостойкость, химическую стойкость и отличную механическую прочность.

В настоящее время для защитно-декоративной окраски изделий авиационной техники применяют лакокрасочные материалы на основе фторсодержащих пленкообразователей. В зависимости от целевой функции защитного покрытия можно представить их следующую классификацию (табл. 3).

Таблица 3

| Фторсодержащие лакокрасочные материалы авиационного назначения | |
|---|--|
| Функция | Наименование лакокрасочного материала |
| Защита от атмосферных факторов | Эмали марок ВЭ-69, ВЭ-75, ВЭ-84, лак ВЛ-25 |
| Защита от воздействия синтетических масел и рабочих жидкостей | Эмаль ВЭ-46, лак ФП-5182 |
| Защита от повышенной влажности | Лаки марок ФП-5182М, ВЛ-18, ВЛ-21 |
| Стойкость к ударным нагрузкам | Эмали марок КЧ-5185, КЧ-5230 |
| Стабилизация радиотехнических свойств в процессе эксплуатации | Эмали марок ФП-566, ФП-5105 |

Очевидно, что данный класс пленкообразующих веществ способен обеспечивать целый спектр потребностей и задач, возложенных на специальные защитные покрытия.

Заключения

В настоящее время в России поддерживается стабильный спрос на фторполимеры, вместе с тем ассортимент данных полимерных продуктов уступает ассортименту материалов аналогичного назначения иностранных производителей.

Для повышения конкурентоспособности отечественной авиатехники в данный момент необходимо расширить сырьевую базу, в связи с чем применение фторированных полимеров наряду со многими другими пленкообразующими (эпоксидными, уретановыми, акриловыми) является актуальной задачей.

Применение различных фторсодержащих сополимеров позволяет направленно регулировать свойства защитных покрытий, наделяя их широким спектром функций.

Список источников

1. 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.
2. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения // Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87. № 9. С. 827–839.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. № 3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Еськов А.А., Лебедева Т.А. Комплексные системы лакокрасочных покрытий для защиты металлических полимерных композиционных материалов, а также их контактных соединений от воздействия агрессивных факторов // Лакокрасочные материалы и их применение. 2016. № 6. С. 32–35.
5. Абрамова М.Г., Луценко А.Н., Варченко Е.А. Об особенностях подтверждения соответствия климатической стойкости материалов авиационного назначения на всех этапах жизненного цикла (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.

6. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
7. Кузнецова В.А., Марченко С.А., Емельянов В.В., Железняк В.Г. Исследование влияния молекулярной массы эпоксидных олигомеров и отвердителей на эксплуатационные свойства лакокрасочных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.12.2024). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-1-71-79.
8. Козлова А.А., Кондратьева О.В., Кузнецова В.А. Основные проблемы применения влагозащитных электроизоляционных материалов отечественного производства для автоматизированного селективного нанесения на печатные узлы (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 4 (69). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-72-83.
9. Сердцелюбова А.С., Кречетов Д.Д. Пути повышения атмосферостойкости лакокрасочных материалов, применяемых для окраски внешней поверхности изделий авиационной техники // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2021. № 9. С. 31–38.
10. Дринберг А.С. Окраска композиционных материалов // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2017. № 3. С. 22–31.
11. Никалин Д.М., Меркулова Ю.И., Железняк В.Г. Фторсодержащие полимерные лакокрасочные материалы в авиационной технике. Обзор // *Российский химический журнал*. 2019. Т. LXIII. № 1. С. 86–93.
12. Дринберг А.С., Козлова С.П., Карпов В.А. Защитные покрытия на основе фторированных полимеров // *Химическая промышленность*. 2019. № 4. С. 185–192.
13. Дринберг А.С., Карпов В.А., Охрименко А.Г. Защитные покрытия на основе фторированных полимеров // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2017. № 7-8. С. 39–43.
14. Дринберг А.А., Бабкин О.Э., Дринберг А.С. и др. Перспективные направления исследований и разработок в технологии создания новых противообрастающих материалов // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2022. № 12. С. 18–23.
15. Дринберг А.С., Бабкин О.Э., Литосов Г.Э. и др. Разработка технологии производства антифрикционных химически стойких фторуретановых покрытий для оборудования систем подводной добычи углеводородов // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2023. № 3 (552). С. 22–28.
16. Бузник В.М. Состояние отечественной химии фторполимеров и возможные перспективы развития // *Российский химический журнал*. 2008. Т. LII. № 3. С. 7–12.
17. Бузник В.М. Современное материаловедение на примере фторполимеров. Томск: ТГУ, 2012. Вып. 1. 42 с. (Академические чтения в Томском государственном университете).
18. Игнатьева Л.Н., Бузник В.М. Квантово-химические расчеты спектроскопических и топологических параметров фторуглеродных олигомеров // *Журнал физической химии*. 2005. Т. 79. № 9. С. 1631–1638.
19. Логинов Б.А., Виллемсон А.Л., Бузник В.М. Российские фторполимеры: история, технологии, перспективы. М., 2013. 320 с.
20. Усманов Х.У., Юльчибаев А.А. Винилфторид и его полимеры. М.: Химия, 1978. 227 с.
21. Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. Л.: Химия, 1978. 232 с.
22. Бейдер Э.Я., Донской А.А., Железина Г.Ф. и др. Опыт применения фторполимерных материалов в авиационной технике // *Российский химический журнал*. 2008. Т. LII. № 3. С. 30–44.
23. Игнатьева Л.Н., Бузник В.М. Квантово-химический расчет ИК-спектров поглощения модифицированных форм политетрафторэтилена // *Журнал физической химии*. 2006. Т. 80. № 12. С. 2178–2187.
24. Huang X., Terylo N., Pommier-Budinger V. et al. A survey of acephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications // *Progress in Aerospace Sciences*. 2019. Vol. 105. P. 74–97.
25. Фторсодержащие полимеры: каталог. Черкассы: ОНИИТЭХИМ, 1985. 20 с.
26. Глазер Е.А., Мулин Ю.А. Достижения в производстве, переработке и применении порошковых полимерных материалов / под ред. А.Д. Яковлева. Л.: ЛДНТП, 1980. 88 с.

27. Wriqht T. Clear skies ahead or more turbulence // *Coating World*. 2009. No. 8. P. 26–28.
28. Rytikov G.O., Doronin F.A., Evdokimov A.G. et al. The effect of the surface morphological inhomogeneities on the polymer films mycological resistance // *Protection of metals and physical chemistry of surfaces*. 2021. Vol. 57. P. 329–338. DOI: 10.1134/S2070205121020088.
29. Гидрофобное полимерное покрытие: пат. RU 2676644 С1 Рос. Федерация; заявл. 11.04.18; опубл. 09.01.19.
30. Фторполимеры / под ред. Л. Уолла; пер. с англ. И.Л. Кнуянца, В.А. Пономаренко. М.: Химия, 1975. 450 с.

References

1. 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.
2. Buznik V.M., Kablov E.N. State and Prospects of Arctic Materials Science. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 87, no. 9, pp. 827–839.
3. Kablov E.N. Modern Materials – the Basis for Innovative Modernization of Russia. *Metally Evrazii*, 2012, no. 3, pp. 10–15.
4. Kablov E.N., Semenova L.V., Eskov A.A., Lebedeva T.A. Complex Systems of Paint and Varnish Coatings for the Protection of Metal Polymer Composite Materials, as Well as Their Contact Joints from the Impact of Aggressive Factors. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2016, no. 6, pp. 32–35.
5. Abramova M.G., Lutsenko A.N., Varchenko E.A. Concerning the aspects of validation of climate resistance of airborne materials at all life cycle stages (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
6. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 14, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
7. Kuznetsova V.A., Marchenko S.A., Emelyanov V.V., Zheleznyak V.G. Study of the influence of molecular mass of epoxy oligomers and hardeners on the operational properties of paint coatings. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 17, 2024). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-1-71-79.
8. Kozlova A.A., Kondrateva O.V., Kuznetsova V.A. The main problems of using domestically produced moisture-proof electrical insulating materials for automated selective application on printed assemblies (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-72-83.
9. Serdtselyubova A.S., Krechetov D.D. Ways to improve the weather resistance of paints and varnishes used for painting the outer surface of aviation equipment. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2021, no. 9, pp. 31–38.
10. Drinberg A.S. Painting of composite materials. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2017, no. 3, pp. 22–31.
11. Nikalin D.M., Merkulova Yu.I., Zheleznyak V.G. Fluorine-containing polymer paints and varnishes in aviation equipment. Review. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2019, vol. LXIII, no. 1, pp. 86–93.
12. Drinberg A.S., Kozlova S.P., Karpov V.A. Protective coatings based on fluorinated polymers. *Khimicheskaya promyshlennost*, 2019, no. 4, pp. 185–192.
13. Drinberg A.S., Karpov V.A., Okhrimenko A.G. Protective coatings based on fluorinated polymers. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2017, no. 7–8, pp. 39–43.
14. Drinberg A.A., Babkin O.E., Drinberg A.S. et al. Promising areas of research and development in the technology of creating new antifouling materials. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2022, no. 12, pp. 18–23.

15. Drinberg A.S., Babkin O.E., Litosov G.E. et al. Development of technology for the production of antifriction chemically resistant fluororethane coatings for equipment of underwater hydrocarbon production systems. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2023, no. 3 (552), pp. 22–28.
16. Buznik V.M. The state of domestic chemistry of fluoropolymers and possible development prospects. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2008, vol. LII, no. 3, pp. 7–12.
17. Buznik V.M. *Modern Materials Science Using Fluoropolymers as an Example*. Tomsk: TSU, 2012, is. 1, 42 p. (Academic Readings at Tomsk State University).
18. Ignatyeva L.N., Buznik V.M. Quantum-Chemical Calculations of Spectroscopic and Topological Parameters of Fluorocarbon Oligomers. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2005, vol. 79, no. 9, pp. 1631–1638.
19. Loginov B.A., Willemson A.L., Buznik V.M. *Russian Fluoropolymers: History, Technologies, Prospects*. Moscow, 2013, 320 p.
20. Usmanov Kh.U., Yulchibaev A.A. *Vinyl Fluoride and Its Polymers*. Moscow: Khimiya, 1978, 227 p.
21. Panshin Yu.A., Malkevich S.G., Dunaevskaya Ts.S. *Fluoroplastics*. Leningrad: Khimiya, 1978, 232 p.
22. Bader E.Ya., Donskoy A.A., Zhelezina G.F. et al. Experience in the use of fluoropolymer materials in aviation technology. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2008, vol. LII, no. 3. pp. 30–44.
23. Ignatieva L.N., Buznik V.M. Quantum chemical calculation of IR absorption spectra of modified forms of polytetrafluoroethylene. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2006, vol. 80, no. 12, pp. 2178–2187.
24. Huang X., Tepylo N., Pommier-Budinger V. et al. A survey of acephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, vol. 105, pp. 74–97.
25. *Fluorine-containing polymers: catalogue*. Cherkassy: ONITEKHIM, 1985, 20 p.
26. Glazer E.A., Mulin Yu.A. *Achievements in production, processing and application of powder polymeric materials*. Ed. A.D. Yakovlev. Leningrad: LDNTP, 1980, 88 p.
27. Wright T. Clear skies ahead or more turbulence. *Coating World*, 2009, no. 8, pp. 26–28.
28. Rytikov G.O., Doronin F.A., Evdokimov A.G. et al. The effect of the surface morphological inhomogeneities on the polymer films mycological resistance. *Protection of metals and physical chemistry of surfaces*, 2021, vol. 57, pp. 329–338. DOI: 10.1134/S2070205121020088.
29. *Hydrophobic polymer coating*: pat. RU 2676644 C1 Rus. Federation; appl. 11.04.18; publ. 09.01.19.
30. *Fluoropolymers*. Ed. L. Wall; trans. from Engl. Moscow: Khimiya, 1975, 450 p.

Информация об авторах

Сердцелюбова Алевтина Сергеевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ошмарина Таиса Ярославовна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зверевич Юлия Константиновна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alevtina S. Serdtselyubova, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Taisa Ya. Oshmarina, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yulia K. Zverevich, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.03.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.03.2025.
The article was submitted 14.03.2025; approved and accepted for publication after reviewing 20.03.2025.