

Научная статья

УДК 629.7.023.222

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-122-134

## МОДИФИКАЦИЯ АКРИЛОВЫХ СОПОЛИМЕРОВ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Д.А. Измалков<sup>1</sup>, К.Р. Ахмадиева<sup>1</sup>, В.В. Боков<sup>1</sup>, М.С. Кожухаров<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Проведен анализ публикаций, посвященных различным способам модификации акриловых сополимеров на водной основе. Приведены достоинства и недостатки акриловых покрытий на водной основе. Рассмотрены физические и химические методы модификации, которые позволяют направленно изменять свойства акриловых сополимеров на водной основе. Показано практическое использование указанных методов модификации для повышения водостойкости, коррозионной стойкости, термических и физико-механических свойств акриловых покрытий на водной основе.

**Ключевые слова:** акриловый сополимер на водной основе, физическая модификация, химическая модификация, физико-механические свойства, термические свойства, коррозионная стойкость, водостойкость

**Для цитирования:** Измалков Д.А., Ахмадиева К.Р., Боков В.В., Кожухаров М.С. Модификация акриловых сополимеров на водной основе для повышения эксплуатационных свойств лакокрасочных покрытий // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-122-134.

Scientific article

## MODIFICATION OF WATER-BASED ACRYLIC COPOLYMERS TO IMPROVE THE PERFORMANCE PROPERTIES OF PAINT COATINGS

D.A. Izmailkov<sup>1</sup>, K.R. Akhmadieva<sup>1</sup>, V.V. Bokov<sup>1</sup>, M.S. Kozhukharov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal 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 analyzes publications on various methods of modification of water-based acrylic copolymers and provides the advantages and disadvantages of water-based acrylic coatings. The physical and chemical modification methods that make it possible to change the properties of water-based acrylic copolymers are considered. The paper shows the practical use of these modification methods for increasing water and corrosion resistance, as well as thermal and physical-mechanical properties of water-based acrylic coatings.

**Keywords:** water-based acrylic copolymer, physical modification, chemical modification, physical-mechanical properties, thermal properties, corrosion resistance, water resistance

**For citation:** Izmailkov D.A., Akhmadieva K.R., Bokov V.V., Kozhukharov M.S. Modification of water-based acrylic copolymers to improve the performance properties of paint coatings. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-122-134.

### Введение

В промышленности широко распространены лакокрасочные материалы (ЛКМ), в состав которых входят летучие органические соединения или их смеси для снижения вязкости, равномерного распределения всех компонентов и оптимального времени высыхания. Однако в последнее время важной проблемой является уменьшение вредного воздействия на атмосферу. В связи с этим постепенно растет спрос на производство пленкообразующих для покрытий на водной основе, что позволяет уменьшить выбросы летучих органических соединений. Среди таких продуктов можно выделить акриловые ЛКМ на водной основе, которые широко используются во многих областях – например, в авиа-, автомобиле- и кораблестроении, строительстве и др.

В качестве сырья для данных пленкообразующих используют акриловые кислоты, их эфиры и непредельные мономеры, которые сополимеризуют друг с другом под действием инициаторов радикальной полимеризации (рис. 1). Получают смолы на водной основе обычно в растворе, суспензии, эмульсии и массе. Регулируя соотношения мономеров между собой, молекулярную массу и молекулярно-массовое распределение сополимеров, можно получить различные свойства готовых твердых пленок.

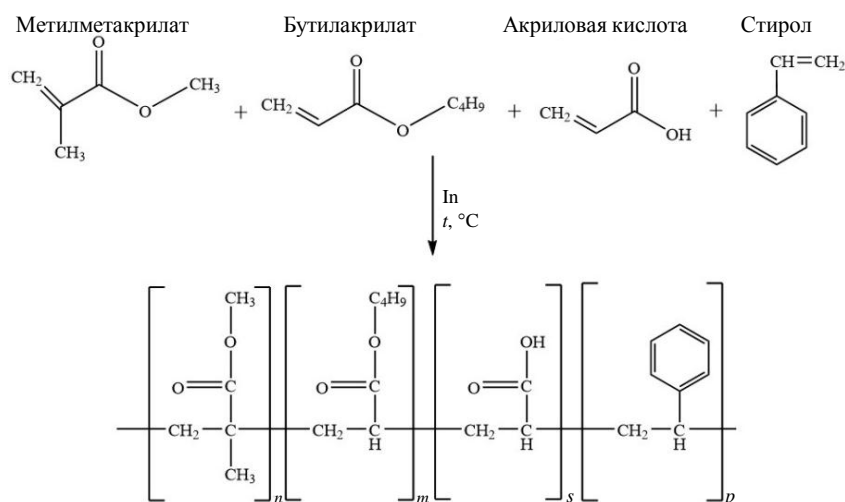


Рис. 1. Схема синтеза акрилового сополимера на водной основе

Среди достоинств покрытий на основе акриловых ЛКМ можно выделить высокую стойкость к ультрафиолету и теплу [1], химическую стойкость [2], низкую стоимость и атмосферостойкость, внешний вид и прозрачность пленки [3].

Однако благодаря наличию гидрофильных карбоксильных групп в составе сополимера и высокой поверхностной энергии указанные материалы склонны к поглощению воды. Таким образом, покрытия на основе акриловых смол имеют низкие водо- и коррозионную стойкость, недостаточные механическую прочность и стойкость к истиранию, высокую температуру пленкообразования и др. [4].

Для устранения указанных недостатков акриловых пленкообразующих применяют различные способы модификации для улучшения характеристик покрытий на их основе, которые будут рассмотрены далее (рис. 2). Основными методами улучшения свойств пленок являются физическая и химическая модификации. Первый способ заключается в физическом или механическом добавлении и распределении различных нанонаполнителей и добавок в полимерной матрице, тем самым повышаются эксплуатационные и технологические свойства материала [5]. При этом важным фактором является совместимость органических и неорганических веществ с полимерными

макромолекулами. Другой метод основан на химических реакциях сополимеризации и сшивания, а именно – модификации на молекулярном уровне [6]. При этом готовые покрытия обладают комплексом свойств ЛКМ, включающим преимущества пленкообразующих различной химической природы. Таким образом, физическая модификация – простой способ улучшения свойств акриловых пленкообразующих на водной основе, но далеко не достаточный, в то время как химическая модификация является надежной и долговечной.

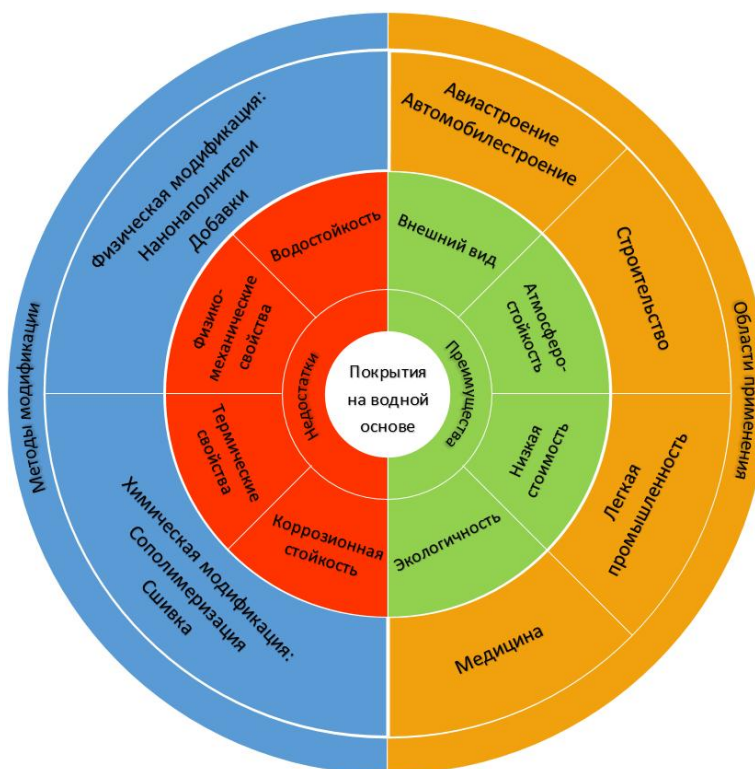


Рис. 2. Общие сведения об акриловых покрытиях на водной основе

В данной статье проведен анализ публикаций, касающихся различных способов модификации акриловых сополимеров на водной основе для повышения водостойкости, коррозионной стойкости, термических и физико-механических свойств.

Работа проведена в рамках реализации стратегического направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.7. «Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [7].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Модификация акриловых сополимеров на водной основе

#### для повышения термических свойств лакокрасочных покрытий

Термические характеристики акриловых пленкообразующих (такие как термостойкость, теплоизоляция, термоокислительная стабильность и огнестойкость [8]) являются одними из важных эксплуатационных свойств, определяющих области применения ЛКМ на их основе. В первую очередь они заключаются в способности материала переносить различные температуры и изменять свою форму при этих условиях.

Термические свойства термореактивных акриловых сополимеров на водной основе проще всего регулировать с помощью изменения степени сшивки макромолекул [9]. Для получения покрытия выбирают необходимые отвердители и катализаторы. С целью повышения теплостойкости можно получать жесткие полимерные цепи в составе акриловых пленкообразующих [10]. Для улучшения огнестойкости существует метод модификации смол соединениями с высоким содержанием углерода, который выделяется при горении на поверхности ЛКМ в виде пленки и затрудняет дальнейшее распространение огня [11]. Например, добавление к смеси акриловых мономеров акрилонитрила повышает последующую термическую стабильность готового покрытия за счет нитрильных групп [12]. В работе [13] авторы получили нанокompозитный материал на основе акрилата бентонита. Готовое покрытие имело структуру наноглины, которая обладает повышенными термическими свойствами.

К способам физической модификации относят смешивание акриловых сополимеров с наполнителями, однако для достижения лучшего эффекта твердые частицы должны быть хорошо диспергированы в получаемом ЛКМ. Например, авторы работы [14] создали теплоизоляционный ЛКМ на основе данных смол с добавлением пустотелых стеклянных наполнителей или стеклянных микросфер, которые равномерно распределяли в композиции с помощью высокоскоростного перемешивания. Добавление же пигмента  $Al_2O_3$  способно повысить барьерные характеристики и термостойкость акриловых пленок любой толщины [15]. В работе [1] показано, что добавление 5 % (по массе) аэрогеля на основе диоксида кремния к акриловым эмульсиям на водной основе привело к повышению температуры деструкции образцов на 20 °С. Причем такие покрытия толщиной 120 мкм обладали улучшенными теплоизоляционными свойствами и позволили снизить температуру металлической поверхности на 7–8 °С.

#### **Модификация акриловых сополимеров на водной основе для повышения водостойкости лакокрасочных покрытий**

Другой важной эксплуатационной характеристикой является водостойкость покрытий, которая определяется главным образом гидрофобностью сополимеров, характером взаимодействия между полимерными цепями и наличием полярных групп в составе макромолекул. Особое значение имеют поверхностная энергия и шероховатость поверхности покрытия [16, 17].

Часто используют химическую модификацию фтором [18], который, будучи полярным атомом, придает покрытиям гидрофобность, или кремнием, повышающим шероховатость пленки. Авторы работы [19] использовали эти преимущества и прививали кремний на фторированную акриловую водную эмульсию с низкой поверхностной энергией. Благодаря такой модификации краевой угол смачивания увеличился с 83 до 110 градусов. Кремнийсодержащие соединения и связующие способны вступать в реакцию отверждения с акриловыми пленкообразующими на водной основе. При этом происходит образование трехмерной сетчатой структуры с низкой поверхностной энергией [20]. Например, в работе [21] получена гидроксилсодержащая акриловая смола, модифицированная ацетатом бутирата целлюлозы, которую впоследствии отверждали  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисиланом. Твердое покрытие обладало плотной сшитой структурой и низким поверхностным натяжением, что привело к увеличению краевого угла смачивания. В работе [22] получены блочные акриловые сополимеры с помощью RAFT-эмульсионной полимеризации (полимеризация с обратимой передачей цепи) в воде с использованием фторированных мономеров – 2,2,2-трифторэтилметакрилата и 2,2,3,4,4,4-гексафторбутилакрилата. Таким образом, при содержании фтора в конечных эмульсиях от 5 до 20 % (по массе) конечные покрытия имели угол контакта с водой

>100 градусов, что свидетельствует о повышенной гидрофобности. В работе [23] авторы получили фторированную акриловую эмульсию, которую затем смешивали с наночастицами диоксида кремния с поверхностью, модифицированной силановым связующим. Выявлено, что функционализированный  $\text{SiO}_2$  изменяет поверхностную структуру готового покрытия, увеличивая шероховатость и гидрофобность.

Существуют также примеры модификации эпоксидными смолами. Авторы работы [24] синтезировали в несколько этапов водорастворимое пленкообразующее путем прививочной этерификации акриловой и эпоксидной смол. Твердые покрытия за счет внутренней структуры образовывали сшитую сеть, которая замедляла диффузию воды вглубь материала и повышала его прочность. В работе [25] для модификации акрилового латекса на водной основе использован 3,3',5,5'-тетраметил-4,4'-бифенилдиглицидиловый эфир (рис. 3). Благодаря такому решению водостойкость конечного покрытия увеличилась до 35 дней, при этом также увеличились физико-механические характеристики пленки. Полученный ЛКМ рекомендован для защиты деревянных изделий [26].

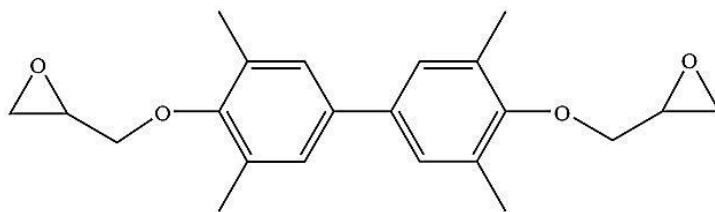


Рис. 3. Структурная формула 3,3',5,5'-тетраметил-4,4'-бифенилдиглицидилового эфира

В работе [27] представлен синтез сополимера алкидной и акриловой смол с использованием инициаторов радикальной полимеризации. Выявлено, что при содержании 10 % (по массе) гидрофобных алкидных цепей в пленкообразующем краевой угол смачивания пленок с водой составил 90 градусов. Наименьшие показатели водопоглощения и коэффициента диффузии воды достигнуты при содержании 25 % (по массе) алкидной смолы при угле смачивания ~95 градусов.

Авторами работы [28] представлен метод физической модификации акриловой дисперсии на водной основе, который заключается в смешении продукта с парафиновой дисперсией и последующим нанесением покрытия. Такой способ позволил получить материал с пониженными показателями паропроницаемости и влагопоглощения, а также способствовал увеличению краевого угла смачивания и гидрофобности.

#### **Модификация акриловых сополимеров на водной основе для повышения физико-механических свойств лакокрасочных покрытий**

К физико-механическим свойствам покрытий на основе водоразбавляемых акриловых сополимеров относят прочность при ударе и изгибе, жесткость, твердость и др.

Одним из способов улучшения вышеуказанных характеристик является повышение плотности сшивки полимерной цепи. Наличие в пленкообразующем свободных функциональных групп может приводить к поглощению энергии извне или к обеспечению пластификации композиции с одной стороны, однако из-за этого могут снижаться механические параметры пленки. Плотная же система поперечных связей между макромолекулами повышает жесткость и прочность материала до определенного предела, после чего с повышением степени сшивки покрытие может стать хрупким. Авторы работы [29] выяснили, что при отверждении акрилового водного пленкообразующего на

основе глицидилметакрилата аминопропилтриэтоксисиланом образуется пленка с оптимально сшитой структурой и высокими механическими характеристиками.

Помимо химической модификации повышение свойств готовой композиции возможно с помощью добавления неорганических соединений. Для равномерного распределения наполнителя в полимерной матрице применяют пластификаторы, коалесцирующие агенты и другие добавки. Например, существуют методы введения в композицию частиц  $\text{SiO}_2$  с модифицированной поверхностью, при этом происходит распределение нагрузки в конечном продукте и улучшение его прочностных характеристик. Для создания нанокомпозитов используют оксиды металлов ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и др.) [30, 31], слоистые материалы [32], нанотрубки [33–35] и др.

На свойства ЛКМ на основе акриловых водоразбавляемых сополимеров также влияет соотношение жестких и мягких мономеров, основанное на их разных температурах стеклования, и молекулярно-массовое распределение. Температура стеклования возрастает с ростом молекулярной массы пленкообразующего до определенного значения, а именно – до образования статического сегмента макромолекулы [36]. Пленкообразующие с высокими молекулярными массами и узким интервалом молекулярно-массового распределения имеют высокую вязкость растворов и высокие механические характеристики, однако их переработка в готовое изделие имеет ряд трудностей, поэтому при производстве ЛКМ используют пленкообразующие, молекулярная масса которых находится в пределах от 1000 до 10000 г/моль. Температура стеклования сополимера и его физико-механические свойства определяются выбором соотношений различных мономеров при синтезе [37]. Например, авторы работы [38] выяснили, что повышение содержания бутилакрилата с температурой стеклования гомополимера, равной 32 °С, приводит к увеличению гибкости пленок, однако при этом происходит снижение прочности на растяжение и удлинение, а также показали способ получения гибридной дисперсии на основе полимочевины, модифицированной метилметакрилатом и бутилакрилатом, с последующим получением покрытия с повышенными твердостью по Кеннингу и модулем упругости. С другой стороны, добавление в состав сополимеров мономеров стирола и акрилонитрила с высокими температурами стеклования заметно улучшает ударопрочность, износостойкость и физико-механические свойства готового лакокрасочного покрытия.

Совмещение акриловых сополимеров с другими пленкообразующими позволяет получать материалы, обладающие преимуществами обоих полимеров. Например, авторы работы [39] сначала получили алкидную смолу, а затем радикальной полимеризацией модифицировали ее акриловым мономером. В результате готовая пленка обладала высокой твердостью, ударопрочностью и адгезией. Модификация соединениями с эпоксидными группами также приводит к повышению прочности при растяжении материала [25].

#### **Модификация акриловых сополимеров на водной основе для повышения коррозионной стойкости лакокрасочных покрытий**

Каждый год на защиту металлических изделий от коррозии тратится значительное количество ресурсов и рабочей силы [40]. Для предотвращения такого воздействия широко применяются водные акриловые смолы [41] благодаря таким свойствам, как атмосферостойкость, экологичность, устойчивость к кислотам, щелочам и другим веществам. Существует два метода защиты металла от коррозии.

Первый из них основан на внешней защите, который заключается в предотвращении проникновения электролитов с помощью введения в пленкообразующее фтор- и кремнийсодержащих мономеров для повышения гидрофобности, добавления

тонкодисперсных наполнителей, а также путем улучшения структуры полимерной матрицы и модификации другими смолами [6, 17]. Непроницаемые наночастицы, вводимые в пленкообразующее, позволяют повысить барьерные свойства материала против агрессивных сред. Авторы работы [42] показали возможность модификации алкидных смол акрилат-силоксаном с получением покрытия с низким водопоглощением и высокими краевыми углами смачивания, что привело к улучшению антикоррозионных характеристик. В работе [27] приведены синтез алкидных смол с последующей прививкой на них акриловых мономеров и получение пленкообразующего с разветвленной структурой (рис. 4).

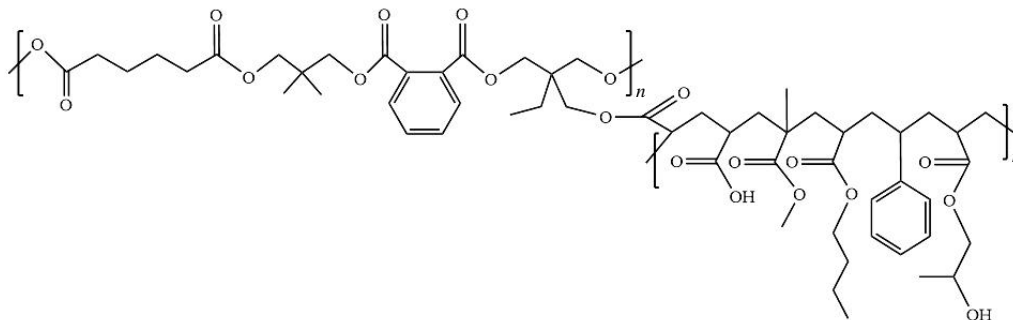


Рис. 4. Акрил-алкидный сополимер с разветвленной структурой

Сделан вывод, что разветвленная структура имеет более низкую температуру стеклования, а это позволяет получать покрытия с плотной упаковкой макромолекул, которая затрудняет внешнюю диффузию агрессивных сред. Наличие свободных полярных групп в пленкообразующем способствует повышению водопоглощения, что негативно влияет на антикоррозионные свойства материала. Поэтому целесообразно проводить химическую сшивку этих групп, что не только улучшает физико-механические характеристики, но и снижает набухание покрытий, содержание геля в пленке [43] и диффузию агрессивных сред [44]. Помимо этого, высокая молекулярная масса пленкообразующего приводит к повышению вязкости ЛКМ и последующему ухудшению окрашиваемости поверхностей и антикоррозионных свойств [45].

В то же время при нанесении и высыхании пленки на ее поверхности появляются различные дефекты, физические и химические изменения, из-за которых электролит может оказаться на границе «металл–покрытие», при этом ухудшая адгезию пленки и подвергая металлическое изделие коррозии. В связи с вышесказанным существует другой способ, а именно – внутренняя защита. Поверхность обрабатывают различными веществами или окисляют ее, создавая защитный слой. Например, широко известно применение фосфатов, которые обладают хорошей адгезией и к металлической подложке, и к ЛКМ. Благодаря этому замедляется горизонтальная диффузия агрессивных ионов и коррозия, происходит повышение адгезии и снижение отслоения пленок [46].

### Заключения

Акриловые сополимеры на водной основе имеют большое практическое значение благодаря сочетанию ценных свойств акрилатов (атмосферостойкости, прозрачности, низкой стоимости и др.) с возможностью использования нетоксичных пожаробезопасных растворителей, не вызывающих загрязнения окружающей среды.

Для улучшения эксплуатационных и защитных характеристик акриловых сополимеров на водной основе и расширения сферы их применения используют физические и химические методы модификации, которые позволяют направленно изменять свойства полимеров – повышать устойчивость к термическим и механическим воздействиям, придавать гидрофобность и др.

Следует отметить, что изучение акриловых сополимеров на водной основе, с учетом их экологической значимости, продолжится в дальнейшем в области совершенствования составов и технологий синтеза, обеспечивающих получение материалов с высокими эксплуатационными и технологическими характеристиками [47].

**Список источников**

1. Karami S., Montahari S., Pishvaei M., Eskandari N. Improvement of thermal properties of pigmented acrylic resin using silica aerogel // *Journal of applied polymer science*. 2018. Vol. 135. No. 1. P. 1–9. DOI: 10.1002/app.45640.
2. Du B., Chen F., Luo R., Zhou S., Wu Z. Synthesis and Characterization of Nano-TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-Acrylic Composite Resin // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 2019. P. 1–7. DOI: 10.1155/2019/6318623.
3. Yilmaz O. High performance nanocomposite coatings based on soft core-reactive shell polyacrylic latex/modified halloysite nanotubes // *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 127. P. 266–275. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.11.026.
4. Zhong S., Li J., Cai Y., Yi L. Novel surfactant-free waterborne acrylic-silicone modified alkyd hybrid resin coatings containing nano-silica for the corrosion protection of carbon steel // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2019. Vol. 58. No. 8. P. 866–878. DOI: 10.1080/03602559.2018.1542711.
5. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Григорьева К.Н. Исследования влияния природы модифицирующих добавок на реологические и термомеханические характеристики фотополимерной композиции на основе эпоксивинилэфирной смолы // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
6. Wei J., Oyang C., Shan X., Gao Q. Advances in water-resistant modification of aqueous acrylic resins: modification methods, mechanism of action // *MATEC Web of Conferences*. 2022. Vol. 363. P. 1–9. DOI: 10.1051/mateconf/202236301024.
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. Yin Y., Jiang B., Zhu X. et al. Investigation of Thermostability of Modified Graphene Oxide/Methylsilicone Resin Nanocomposites // *Engineered Science*. 2019. Vol. 5. P. 73–78. DOI: 10.30919/es8d762.
9. Tang L.S., Zhang M., Zhang S.F., Yang J.Z. High performance waterborne aminoacrylic coatings from the blends of hydrosols and latexes // *Progress in Organic Coatings*. 2004. Vol. 49. No. 1. P. 54–61. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2003.08.007.
10. Yang K., Chen X., Zhang Z. et al. Introducing rigid pyrimidine ring to improve the mechanical properties and thermal-oxidative stabilities of phthalonitrile resin // *Polymers for Advanced Technologies*. 2019. Vol. 31. No. 2. P. 328–337. DOI: 10.1002/pat.4773.
11. Bai L., Zheng S., Bao R. et al. Effect of PLA Crystallization on the Thermal Conductivity and Breakdown Strength of PLA/BN Composites // *ES Materials & Manufacturing*. 2019. Vol. 3. P. 66–72. DOI: 10.30919/esmm5f195.
12. Xiong K., Wang L., Zhang A. The Mechanical Properties, Compatibility, and Thermal Stabilities of POE-Graft-Methyl Methacrylate and Acrylonitrile(POE-g-MAN)/ Styrene-Acrylonitrile Copolymer (SAN Resin) Blends // *Journal of Macromolecular Science, Part B*. 2011. Vol. 50. No. 7. P. 1350–1363. DOI: 10.1080/00222348.2010.516178.
13. Romo-Uribe A., Santiago-Santiago K., Zavala-Padilla G. et al. Waterborne layered silicate/acrylate nanocomposites by in-situ emulsion polymerization: Thermal and mechanical reinforcement // *Progress in Organic Coatings*. 2016. Vol. 101. P. 59–70. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2016.07.014.
14. Insulating paint for interior and exterior of buildings and method of making same: pat. 4623390A US; appl. 04.11.85; publ. 18.11.86.
15. Comite A., Cozza E.S., Di Tanna G. et al. Influence of counter ions in electrochemical properties and kinetic parameters of poly tyramine electroactive film // *Progress in Organic Coatings*. 2015. Vol. 78. P. 124–132.

16. Jiao C., Sun L., Shao Q. et al. Advances in Waterborne Acrylic Resins: Synthesis Principle, Modification Strategies, and Their Applications // ACS Omega. 2021. Vol. 6. P. 2443–2449. DOI: 10.1021/acsomega.0c05593.
17. Марченко С.А., Железняк В.Г., Кузнецова В.А. Применение и модификация частиц для создания супергидрофобных покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.
18. Timperley C.M., Arbon R.E., Bird M. et al. Bis(fluoroalkyl)acrylic and methacrylic phosphate monomers, their polymers and some of their properties // Journal of Fluorine Chemistry. 2003. Vol. 121. No. 1. P. 23–31. DOI: 10.1016/S0022-1139(02)00314-7.
19. Yang W., Zhu L., Chen Y. et al. Surface topography and hydrophobicity of waterborne fluorinated acrylic/silica hybrid coatings // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2015. Vol. 484. P. 62–69. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2015.07.053.
20. Xu H., Qiu F., Wang Y. et al. Preparation, Mechanical Properties of Waterborne Polyurethane and Crosslinked Polyurethane-Acrylate Composite // Journal of Applied Polymer Science. 2012. Vol. 124. No. 2. P. 958–968. DOI: 10.1002/app.35127.
21. Zheng B., Ge S., Wang S. et al. Effect of  $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane on the properties of cellulose acetate butyrate modified acrylic waterborne coatings // Reactive and Functional Polymers. 2020. Vol. 154. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104657.
22. Jiang Y., Li L., Liu J. et al. Hydrophobic films of acrylic emulsion by incorporation of fluorine-based copolymer prepared through the RAFT emulsion copolymerization // Journal of Fluorine Chemistry. 2016. Vol. 183. P. 82–91. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2016.01.010.
23. Li L., Li X., Shen Y. et al. Hydrophobicity and corrosion resistance of waterborne fluorinated acrylate/silica nanocomposite coatings // e-Polymers. 2021. Vol. 21. No. 1. P. 779–792. DOI: 10.1515/epoly-2021-0079.
24. Liu M., Mao X., Zhu H. et al. Water and corrosion resistance of epoxy–acrylic–amine waterborne coatings: Effects of resin molecular weight, polar group and hydrophobic segment // Corrosion Science. 2013. Vol. 75. P. 106–113. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.05.020.
25. Bi J., Liu Y., Gao F. et al. Improving water resistance and mechanical properties of waterborne acrylic resin modified by 3,3',5,5'-tetramethyl-4,4'-biphenyl diglycidyl ether // Surfaces and Interfaces. 2022. Vol. 35. P. 1–34. DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102426.
26. Liang C., Du Y., Wang Y. et al. Intumescent fire-retardant coatings for ancient wooden architectures with ideal electromagnetic interference shielding // Advanced Composites and Hybrid Materials. 2021. Vol. 4. P. 979–988. DOI: 10.1007/s42114-021-00274-5.
27. Ji S., Gui H., Guan G. et al. Molecular design and copolymerization to enhance the anti-corrosion performance of waterborne acrylic coatings // Progress in Organic Coatings. 2021. Vol. 153. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106140.
28. Терешко А.Е., Голиков И.В., Индейкин Е.А., Краснобаева В.С. Модификация акриловых водно-дисперсных лакокрасочных материалов нефтеуглеводородами // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2007. № 50 (4). С. 77–80.
29. Guo X., Ge S., Wang J. et al. Waterborne acrylic resin modified with glycidyl methacrylate (GMA): Formula optimization and property analysis // Polymer. 2018. Vol. 143. P. 155–163. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.04.020.
30. Nosrati R., Olad A., Maryami F. Visible-light induced anti-bacterial and self-cleaning waterborne polyacrylic coating modified with TiO<sub>2</sub>/polypyrrole nanocomposite; preparation and characterization // Journal of Molecular Structure. 2018. Vol. 1163. P. 174–184. DOI: 10.1016/j.molstruc.2018.02.097.
31. Poddar M.K., Sharma S., Moholkar V.S. Investigations in two-step ultrasonic synthesis of PMMA/ZnO nanocomposites by in situ emulsion polymerization // Polymer. 2016. Vol. 99. P. 453–469. DOI: 10.1016/j.polymer.2016.07.052.
32. Sharma S., Poddar M.K., Moholkar V.S. Enhancement of thermal and mechanical properties of poly(MMA-co-BA)/Cloisite 30B nanocomposites by ultrasound-assisted in-situ emulsion polymerization // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. Vol. 36. P. 212–225. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.11.029.

33. Zahedi F., Amraee I.A. Carboxylated multiwalled carbon nanotubes effect on dynamic mechanical behavior of soft films composed of multilayer polymer structure // *Polymer*. 2018. Vol. 151. P. 187–196. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.07.044.
34. Ткачук А.И., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Любимова А.С. Модификация эпоксидных связующих многостенными углеродными нанотрубками // *Труды ВИАМ*. 2023. № 2 (120). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-63-76.
35. Соловьянич Л.В., Кондрашов С.В. Перспективность использования углеродных нанотрубок для придания поверхности полимерных материалов функциональных свойств (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 9 (103). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-11-21.
36. Крыжановский В.К. Технические свойства полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2003. 203 с.
37. Ростиашвили В.Г., Иржак В.И., Розенберг Б.А. Стеклование полимеров. Л.: Химия, 1987. 192 с.
38. Drake I., Cardoen G., Hughes A. et al. Polyurea-acrylic hybrid emulsions: Characterization and film properties // *Polymers*. 2019. Vol. 181. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.polymer.2019.121761.
39. Shim J.Y., Park D.M., Kim H.O. The Synthesis of Waterborne Acrylic – Modified Alkyd and its Application // *Proceedings of the 24th International Waterborne, High-Solids, and Powder Coatings Symposium*. 1997. P. 159–167.
40. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
41. Madhusudha A.M., Mohana K.N.S., Hegde M.B. et al. Functionalized graphene oxide-epoxy phenolic novolac nanocomposite: an efficient anticorrosion coating on mild steel in saline medium // *Advances Composites and Hybrid Materials*. 2020. Vol. 3. P. 141–155. DOI: 10.1007/s42114-020-00142-8.
42. Zhong S., Li J., Yi L. et al. Cross-linked waterborne alkyd hybrid resin coatings modified by fluorinated acrylate-siloxane with high waterproof and anticorrosive performance // *Polymers for Advanced Technologies*. 2018. Vol. 30. No. 2. P. 292–303. DOI: 10.1002/pat.4464.
43. Pham H.H., Winnik M.A. Polymer Interdiffusion vs Cross-Linking in Carboxylic Acid–Carbodiimide Latex Films. Effect of Annealing Temperature, Reactive Group Concentration, and Carbodiimide Substituent // *Macromolecules*. 2006. Vol. 39. No. 4. P. 1425–1435. DOI: 10.1021/ma051685w.
44. Liu M., Mao X., Zhu H. et al. Water and corrosion resistance of epoxy–acrylic–amine waterborne coatings: Effects of resin molecular weight, polar group and hydrophobic segment // *Corrosion Science*. 2013. Vol. 75. P. 106–113. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.05.020.
45. 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.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
46. Zhong Z., Yu Q., Yao H. et al. Study of the styrene–acrylic emulsion modified by hydroxyl-phosphate ester and its stoving varnish // *Progress in Organic Coatings*. 2013. Vol. 76. No. 5. P. 858–863. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2013.02.008.
47. 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.

### References

1. Karami S., Montahari S., Pishvaei M., Eskandari N. Improvement of thermal properties of pigmented acrylic resin using silica aerogel. *Journal of applied polymer science*, 2018, vol. 135, no. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1002/app.45640.

2. Du B., Chen F., Luo R., Zhou S., Wu Z. Synthesis and Characterization of Nano-TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-Acrylic Composite Resin. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 2019, pp. 1–7. DOI: 10.1155/2019/6318623.
3. Yilmaz O. High performance nanocomposite coatings based on soft core-reactive shell polyacrylic latex/modified halloysite nanotubes. *Progress in Organic Coatings*, 2019, vol. 127, pp. 266–275. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.11.026.
4. Zhong S., Li J., Cai Y., Yi L. Novel surfactant-free waterborne acrylic-silicone modified alkyd hybrid resin coatings containing nano-silica for the corrosion protection of carbon steel. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2019, vol. 58, no. 8, pp. 866–878. DOI: 10.1080/03602559.2018.1542711.
5. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Grigoreva K.N. Research of the influence of the modifying additives nature on the rheological and thermomechanical properties of a photopolymer composition based on epoxy vinyl ester resin. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
6. Wei J., Oyang C., Shan X., Gao Q. Advances in water-resistant modification of aqueous acrylic resins: modification methods, mechanism of action. *MATEC Web of Conferences*, 2022, vol. 363, pp. 1–9. DOI: 10.1051/mateconf/202236301024.
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 tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
8. Yin Y., Jiang B., Zhu X. et al. Investigation of Thermostability of Modified Graphene Oxide/Methylsilicone Resin Nanocomposites. *Engineered Science*, 2019, vol. 5, pp. 73–78. DOI: 10.30919/es8d762.
9. Tang L.S., Zhang M., Zhang S.F., Yang J.Z. High performance waterborne aminoacrylic coatings from the blends of hydrosols and latexes. *Progress in Organic Coatings*, 2004, vol. 49, no. 1, pp. 54–61. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2003.08.007.
10. Yang K., Chen X., Zhang Z. et al. Introducing rigid pyrimidine ring to improve the mechanical properties and thermal-oxidative stabilities of phthalonitrile resin. *Polymers for Advanced Technologies*, 2019, vol. 31, no. 2, pp. 328–337. DOI: 10.1002/pat.4773.
11. Bai L., Zheng S., Bao R. et al. Effect of PLA Crystallization on the Thermal Conductivity and Breakdown Strength of PLA/BN Composites. *ES Materials & Manufacturing*, 2019, vol. 3, pp. 66–72. DOI: 10.30919/esmm5f195.
12. Xiong K., Wang L., Zhang A. The Mechanical Properties, Compatibility, and Thermal Stabilities of POE-Graft-Methyl Methacrylate and Acrylonitrile(POE-g-MAN)/ Styrene-Acrylonitrile Copolymer (SAN Resin) Blends. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 2011, vol. 50, no. 7, pp. 1350–1363. DOI: 10.1080/00222348.2010.516178.
13. Romo-Uribe A., Santiago-Santiago K., Zavala-Padilla G. et al. Waterborne layered silicate/acrylate nanocomposites by in-situ emulsion polymerization: Thermal and mechanical reinforcement. *Progress in Organic Coatings*, 2016, vol. 101, pp. 59–70. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2016.07.014.
14. *Insulating paint for interior and exterior of buildings and method of making same*: pat. 4623390A US; appl. 04.11.85; publ. 18.11.86.
15. Comite A., Cozza E.S., Di Tanna G. et al. Influence of counter ions in electrochemical properties and kinetic parameters of poly tyramine electroactive film. *Progress in Organic Coatings*, 2015, vol. 78, pp. 124–132.
16. Jiao C., Sun L., Shao Q. et al. Advances in Waterborne Acrylic Resins: Synthesis Principle, Modification Strategies, and Their Applications. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, pp. 2443–2449. DOI: 10.1021/acsomega.0c05593.
17. Marchenko S.A., Zheleznyak V.G., Kuznetsova V.A. Application and modification of particles to create superhydrophobic coatings (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.
18. Timperley C.M., Arbon R.E., Bird M. et al. Bis(fluoroalkyl)acrylic and methacrylic phosphate monomers, their polymers and some of their properties. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2003, vol. 121, no. 1, pp. 23–31. DOI: 10.1016/S0022-1139(02)00314-7.

19. Yang W., Zhu L., Chen Y. et al. Surface topography and hydrophobicity of waterborne fluorinated acrylic/silica hybrid coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, vol. 484, pp. 62–69. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2015.07.053.
20. Xu H., Qiu F., Wang Y. et al. Preparation, Mechanical Properties of Waterborne Polyurethane and Crosslinked Polyurethane-Acrylate Composite. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, vol. 124, no. 2, pp. 958–968. DOI: 10.1002/app.35127.
21. Zheng B., Ge S., Wang S. et al. Effect of  $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane on the properties of cellulose acetate butyrate modified acrylic waterborne coatings. *Reactive and Functional Polymers*, 2020, vol. 154, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104657.
22. Jiang Y., Li L., Liu J. et al. Hydrophobic films of acrylic emulsion by incorporation of fluorine-based copolymer prepared through the RAFT emulsion copolymerization. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2016, vol. 183, pp. 82–91. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2016.01.010.
23. Li L., Li X., Shen Y. et al. Hydrophobicity and corrosion resistance of waterborne fluorinated acrylate/silica nanocomposite coatings. *e-Polymers*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 779–792. DOI: 10.1515/epoly-2021-0079.
24. Liu M., Mao X., Zhu H. et al. Water and corrosion resistance of epoxy–acrylic–amine waterborne coatings: Effects of resin molecular weight, polar group and hydrophobic segment. *Corrosion Science*, 2013, vol. 75, pp. 106–113. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.05.020.
25. Bi J., Liu Y., Gao F. et al. Improving water resistance and mechanical properties of waterborne acrylic resin modified by 3,3',5,5'-tetramethyl-4,4'-biphenyl diglycidyl ether. *Surfaces and Interfaces*, 2022, vol. 35, pp. 1–34. DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102426.
26. Liang C., Du Y., Wang Y. et al. Intumescent fire-retardant coatings for ancient wooden architectures with ideal electromagnetic interference shielding. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2021, vol. 4, pp. 979–988. DOI: 10.1007/s42114-021-00274-5.
27. Ji S., Gui H., Guan G. et al. Molecular design and copolymerization to enhance the anti-corrosion performance of waterborne acrylic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2021, vol. 153, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106140.
28. Tereshko A.E., Golikov I.V., Indeikin E.A., Krasnobaeva V.S. Modification of acrylic water-dispersed paints and varnishes with petroleum hydrocarbons. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2007, no. 50 (4), pp. 77–80.
29. Guo X., Ge S., Wang J. et al. Waterborne acrylic resin modified with glycidyl methacrylate (GMA): Formula optimization and property analysis. *Polymer*, 2018, vol. 143, pp. 155–163. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.04.020.
30. Nosrati R., Olad A., Maryami F. Visible-light induced anti-bacterial and self-cleaning waterborne polyacrylic coating modified with TiO<sub>2</sub>/polypyrrole nanocomposite; preparation and characterization. *Journal of Molecular Structure*, 2018, vol. 1163, pp. 174–184. DOI: 10.1016/j.molstruc.2018.02.097.
31. Poddar M.K., Sharma S., Moholkar V.S. Investigations in two-step ultrasonic synthesis of PMMA/ZnO nanocomposites by in situ emulsion polymerization. *Polymer*, 2016, vol. 99, pp. 453–469. DOI: 10.1016/j.polymer.2016.07.052.
32. Sharma S., Poddar M.K., Moholkar V.S. Enhancement of thermal and mechanical properties of poly(MMA-co-BA)/Cloisite 30B nanocomposites by ultrasound-assisted in-situ emulsion polymerization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 36, pp. 212–225. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.11.029.
33. Zahedi F., Amraee I.A. Carboxylated multiwalled carbon nanotubes effect on dynamic mechanical behavior of soft films composed of multilayer polymer structure. *Polymer*, 2018, vol. 151, pp. 187–196. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.07.044.
34. Tkachuk A.I., Kurshev E.V., Lonskii S.L., Lyubimova A.S. Modification of epoxy binders with multi-walled carbon nanotubes. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-63-76.
35. Solovyanchik L.V., Kondrashov S.V. The prospects of using carbon nanotubes to impart functional properties to the surface of polymer materials (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 06, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-11-21.

36. Kryzhanovsky V.K. *Technical properties of polymeric materials*. St. Petersburg: Professiya, 2003, 203 p.
37. Rostiashvili V.G., Irzhak V.I., Rosenberg B.A. *Glass transition of polymers*. Leningrad: Khimiya, 1987, 192 p.
38. Drake I., Cardoen G., Hughes A. et al. Polyurea-acrylic hybrid emulsions: Characterization and film properties. *Polymers*, 2019, vol. 181, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.polymer.2019.121761.
39. Shim J.Y., Park D.M., Kim H.O. The Synthesis of Waterborne Acrylic – Modified Alkyd and its Application. *Proceedings of the 24th International Waterborne, High-Solids, and Powder Coatings Symposium*, 1997, pp. 159–167.
40. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
41. Madhusudha A.M., Mohana K.N.S., Hegde M.B. et al. Functionalized graphene oxide-epoxy phenolic novolac nanocomposite: an efficient anticorrosion coating on mild steel in saline medium. *Advances Composites and Hybrid Materials*, 2020, vol. 3, pp. 141–155. DOI: 10.1007/s42114-020-00142-8.
42. Zhong S., Li J., Yi L. et al. Cross-linked waterborne alkyd hybrid resin coatings modified by fluorinated acrylate-siloxane with high waterproof and anticorrosive performance. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, vol. 30, no. 2, pp. 292–303. DOI: 10.1002/pat.4464.
43. Pham H.H., Winnik M.A. Polymer Interdiffusion vs Cross-Linking in Carboxylic Acid–Carbodiimide Latex Films. Effect of Annealing Temperature, Reactive Group Concentration, and Carbodiimide Substituent. *Macromolecules*, 2006, vol. 39, no. 4, pp. 1425–1435. DOI: 10.1021/ma051685w.
44. Liu M., Mao X., Zhu H. et al. Water and corrosion resistance of epoxy–acrylic–amine waterborne coatings: Effects of resin molecular weight, polar group and hydrophobic segment. *Corrosion Science*, 2013, vol. 75, pp. 106–113. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.05.020.
45. 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: May 06, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
46. Zhong Z., Yu Q., Yao H. et al. Study of the styrene–acrylic emulsion modified by hydroxyl-phosphate ester and its stoving varnish. *Progress in Organic Coatings*, 2013, vol. 76, no. 5, pp. 858–863. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2013.02.008.
47. 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.

### Информация об авторах

**Измалков Дмитрий Александрович**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ахмадиева Ксения Расимовна**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Боков Виталий Викторович**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Кожухаров Максим Сергеевич**, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

### Information about the authors

**Dmitry A. Izmalkov**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Kseniya R. Akhmadieva**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Vitalij V. Bokov**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Maksim S. Kozhukharov**, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.07.2025.  
The article was submitted 30.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 08.07.2025.