

Научная статья

УДК 667.6:535.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-105-118

КЛИМАТИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ СИСТЕМ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ* Часть 3. Сопоставление результатов натуральных и ускоренных климатических испытаний с учетом эффекта сезонности

В.О. Старцев¹

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

Аннотация. Рассмотрены корреляционные зависимости между изменением цветового расстояния образцов алюминиевого сплава с эпоксидной и фторполиуретановой эмалями с пигментами красного и серого цвета при экспонировании в натуральных условиях трех климатических зон и в лабораторных условиях. Показано, что использование модели изменения цветового расстояния, учитывающей дозу солнечной радиации, и полученных корреляционных зависимостей позволяет точно рассчитать продолжительность лабораторных имитационных испытаний.

Ключевые слова: климатическое старение, лакокрасочное покрытие, цветовое расстояние, солнечная радиация, математическое моделирование, прогнозирование

Для цитирования: Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 3. Сопоставление результатов натуральных и ускоренных климатических испытаний с учетом эффекта сезонности // Труды ВИАМ. 2025. № 7 (149). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-105-118.

Scientific article

CLIMATE AGING OF PAINT COATING SYSTEMS Part 3. Comparison of results of natural and accelerated climatic tests taking into account the effect of seasonality

V.O. Startsev¹

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 examines the correlation dependences between the change in the color distance of aluminum alloy samples with epoxy and fluoropolyurethane enamels with red and gray pigments when exposed to natural conditions of three climatic zones and laboratory conditions. It is shown that the use of a model of color distance change, taking into account the dose of solar radiation, and the obtained correlation dependences allows to accurately calculate the duration of laboratory simulation tests.

Keywords: climatic aging, paint coating, color distance, solar radiation, mathematical modeling, forecasting

For citation: Startsev V.O. Climate aging of paint coating systems. Part 3. Comparison of results of natural and accelerated climatic tests taking into account the effect of seasonality. *Trudy VIAM*, 2025, no. 7 (149), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-105-118.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 5 (147), 2025; часть 2 – см. «Труды ВИАМ», № 6 (148), 2025.

Введение

Лакокрасочные покрытия (ЛКП), нанесенные на внешнюю поверхность элементов авиационной техники, не только обеспечивают необходимый декоративный внешний вид изделий, но и ослабляют окисление и деструкцию поверхности материалов под воздействием внешней среды [1, 2]. Современные спектрометрические, микроскопические, электрохимические и другие тонкие физические методы анализа позволяют выявлять механизмы физико-химических превращений в ЛКП [3].

Например, с помощью атомно-силовой микроскопии, инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье и конфокальной рамановской микроскопии удается выявить особенности морфологии, молекулярную структуру и профиль глубины деградации фторированного полиуретанового покрытия на алюминиевом сплаве [4, 5]. Вязкоупругие свойства покрытий в стеклообразном и высокоэластическом состояниях исследуют методами динамического механического анализа [6], используя спектрометрические методы обработки [7] и учитывая многокомпонентность состава [8].

К числу эффективных методов исследования состояния ЛКП относится колориметрия, принципы которой рассмотрены в работе [9].

Изменение свойств ЛКП зависит от действия главных климатических факторов: температуры, влажности и ультрафиолетовой компоненты солнечной радиации [10] в разнообразных климатических регионах [11], включая Арктику [12, 13] и тропики [14–16].

Климатическая агрессивность атмосферы связана с сезонностью и существенно различается в летний и зимний периоды [17, 18]. Это доказывают результаты исследования кинетики светопропускания органического стекла [19] и термопластичных пленок [20, 21] при экспонировании в субтропиках.

Натурные климатические испытания дают наиболее объективную оценку климатической стойкости материалов, поскольку при этом происходит одновременное воздействие всех внешних факторов на исследуемый материал. Для достоверной оценки климатической стойкости материалов обычно требуется не менее 3–5 лет натурных испытаний, поэтому для оперативной оценки используются лабораторные (ускоренные) климатические испытания. В настоящее время существует нормативная документация, которая регламентирует проведение лабораторных климатических испытаний. Тем не менее многие исследования [22–31] показывают существенную неэквивалентность натурального и ускоренного старения. Поэтому проведение климатических испытаний систем ЛКП, а также сопоставление результатов натуральных и ускоренных климатических испытаний являются чрезвычайно актуальными задачами.

В работе [32] приведены результаты искусственного старения двухфазной эпокси-акриловой композиции по циклу ЛИ-14 и исследования адгезии, физико-механических свойств и блеска покрытий. Показано, что по твердости и стойкости к царапанию исследованные системы покрытий превосходят серийные системы.

Результаты исследования термостойкости, эрозионной стойкости, физико-механических свойств ЛКП, изготовленных на основе эпоксидных олигомеров с различной молекулярной массой, приведены в работе [33]. Выявлено, что с увеличением молекулярной массы повышаются термостойкость и эрозионная стойкость эпоксидных олигомеров.

В работе [34] исследована эффективность защиты систем ЛКП при длительном воздействии повышенных температур. Полученные значения адгезии к образцам из алюминиевого сплава позволили оценить качество взаимосвязи различных слоев систем ЛКП. В работе [35] показано, что старение поверхности влияет на деформационно-прочностные показатели полимерных композиционных материалов, что также требует применения защитных систем ЛКП.

Во второй части данной статьи рассмотрено влияние различных климатических зон на изменение цветовых показателей систем ЛКП. Показано, что характер изменения цветового расстояния систем ЛКП при натурном экспонировании в различных климатических зонах идентичен до достижения дозы солнечной радиации ~ 3500 МДж/м².

В данной части статьи проведено сравнение изменения цветовых показателей ЛКП с фторполиуретановой и эпоксидной эмалями с добавлением пигментов красного и серого цвета при проведении лабораторных (ускоренных) климатических испытаний и после испытаний в условиях умеренного, умеренно теплого и сухого субтропического климата.

Материалы и методы

Для испытаний использовали четыре группы образцов из алюминиевого деформируемого сплава с нанесенными системами ЛКП, состоящими из двух грунтовых слоев холодной и горячей сушки, а также фторполиуретанового (ВЭ-69) и эпоксидного (ЭП-140) покрытия с добавлением пигментов красного и серого цвета. Натурные испытания проведены в условиях умеренного, умеренно теплого и сухого субтропического климата. Подробная информация об объектах испытания, условиях натурального экспонирования, основных показателях климатических зон приведена во второй части данной статьи [36].

Для проведения лабораторных климатических испытаний, имитирующих выдержку образцов на открытой площадке, использовали климатическую камеру для имитации годового цикла с системой излучения. Воздействие солнечного излучения проводили в непрерывном режиме при температуре воздуха 45 °С (относительная влажность не нормировалась и не превышала 10 %). Полный спектральный диапазон создаваемого излучения находился в пределах от 290 до 3000 нм. Интегральная плотность потока излучения в интервале длин волн от 290 до 3000 нм составила 1400 Вт/м², плотность потока ультрафиолетового излучения в интервале длин волн от 290 до 400 нм: 120 Вт/м².

При проведении испытаний образцы в камере располагали горизонтально, параллельно источнику излучения, чтобы обеспечить перпендикулярность потока излучения к лицевой поверхности. Образцы размещали на сетчатой полке, обеспечивающей обдув как с лицевой, так и с обратной стороны и не препятствующей попаданию на обратную сторону излучения, отраженного от стенок и дна испытательной камеры (рис. 1).

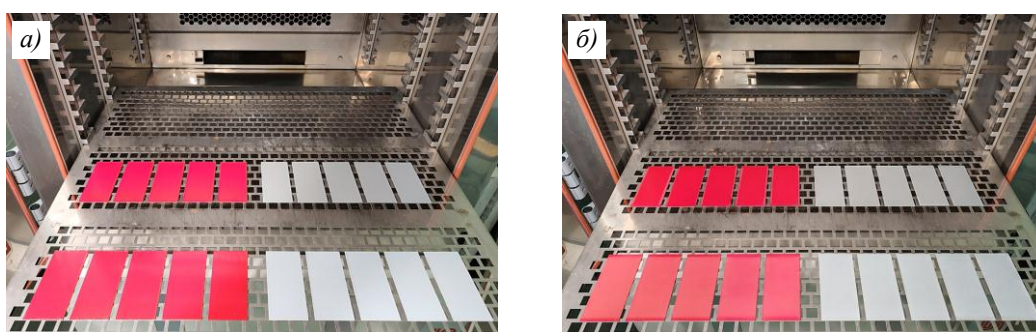


Рис. 1. Образцы из алюминиевого сплава с нанесенными лакокрасочными покрытиями на сетчатой полке климатической камеры для имитации годового цикла с системой излучения перед постановкой на испытания (а) и после 30 сут экспонирования (б)

Температуру воздуха контролировали с помощью термометра сопротивления, защищенного от попадания прямого солнечного излучения экраном и находящегося в области камеры с максимально интенсивным воздухообменом.

Суточная доза солнечной радиации (SR) в климатической камере составляет 121 МДж/м^2 , что значительно превышает суточные дозы при натурном экспонировании. На рис. 2 приведено сравнение суточных доз солнечной радиации в климатической камере, а также в умеренном, умеренно теплом и сухом субтропическом климате в летний период (04.07.2022). Видно, что в летние месяцы суточная доза солнечной радиации в климатической камере в 2,2 больше, чем в сухом субтропическом климате; в 4,7 раза больше, чем в умеренно теплом климате; более чем в 5,7 раза превышает значения в умеренном климате. В зимние месяцы эти соотношения могут увеличиться более чем в 50 раз. Годовая величина суммарной солнечной радиации при экспонировании в климатической камере составит 43560 МДж/м^2 . Это значение многократно превышает этот показатель для умеренного (4405 МДж/м^2), умеренно теплого (5030 МДж/м^2) и сухого субтропического климата (10765 МДж/м^2) за период проведения испытаний. В предыдущей части данной статьи показано [36], что цветовое расстояние всех исследованных систем ЛКП изменяется одинаково во всех климатических зонах до накопления дозы солнечной радиации $\sim 3500 \text{ МДж/м}^2$. Поэтому для сопоставления результатов натуральных и ускоренных испытаний выбрали срок экспонирования образцов в климатической камере 30 сут (до накопления дозы 3630 МДж/м^2).

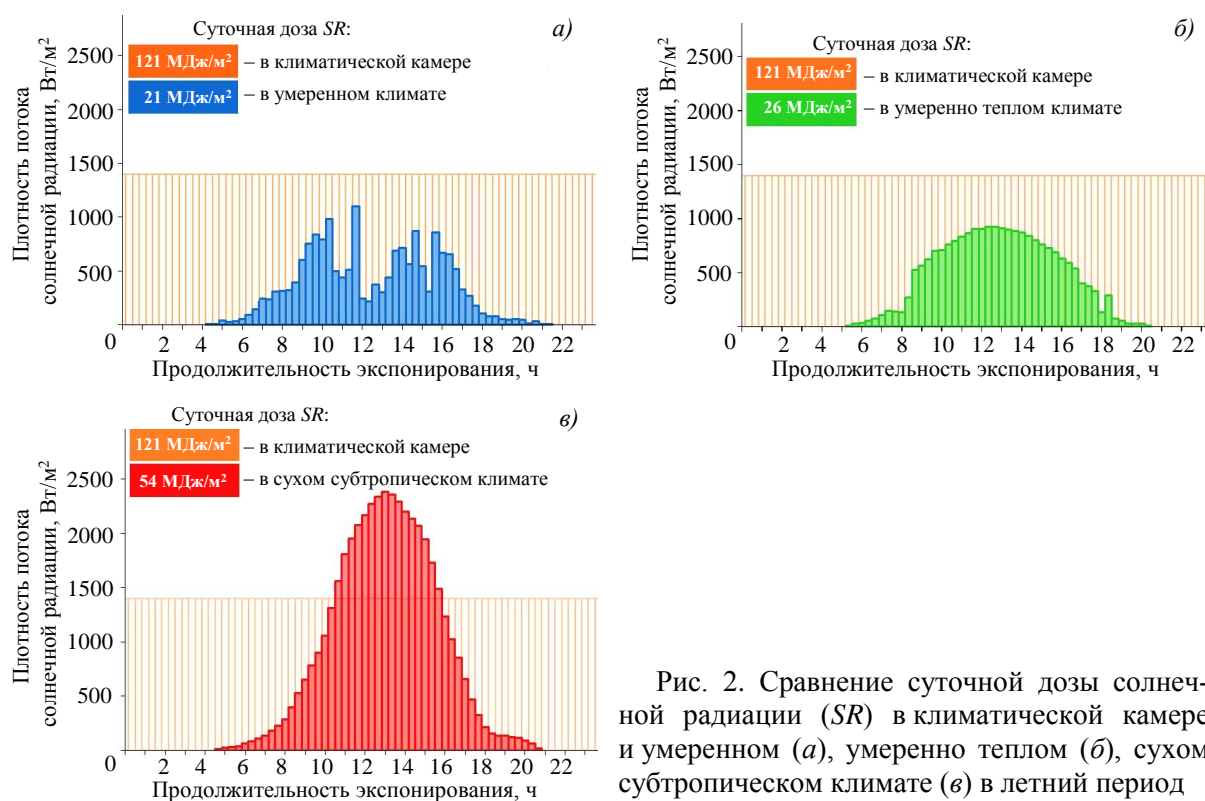


Рис. 2. Сравнение суточной дозы солнечной радиации (SR) в климатической камере и умеренном (а), умеренно теплом (б), сухом субтропическом климате (в) в летний период

С помощью спектрофотометра со сферической геометрией измерения в соответствии с ГОСТ Р 71216–2024 ежедневно (при экспонировании в климатической камере) и еженедельно (при натурном экспонировании) определяли значения различия цвета, светлоты, цветового тона систем ЛКП на экспонируемых образцах и рассчитывали значение полного цветового различия (цветового расстояния) ΔE в системе CIE $L^*a^*b^*$.

Полученные значения цветового расстояния аппроксимировали с помощью соотношений [37, 38]

$$\Delta E = \Delta E_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1)$$

$$\Delta E = \Delta E_{\max} (1 - e^{-\frac{SR}{s}}), \quad (2)$$

где ΔE_{\max} – предельное значение цветового расстояния, усл. ед.; t – продолжительность экспонирования, сут; τ – параметр, характеризующий срок достижения $0,63\Delta E_{\max}$, сут; SR – доза солнечной радиации, МДж/м²; s – параметр, характеризующий дозу солнечной радиации для достижения $0,63\Delta E_{\max}$, МДж/м².

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

Результаты и обсуждение

Изменения цветового расстояния при экспонировании образцов из алюминиевого сплава с нанесенными системами ЛКП в умеренном, умеренно теплом, сухом субтропическом климате, а также в лабораторных условиях в климатической камере в течение 30 сут показаны на рис. 3. Изменение цветового расстояния существенно зависит от условий экспонирования. Отчетливо наблюдается процесс ускорения изменения цветового расстояния при экспонировании в климатической камере. Если коэффициент ускорения старения нормировать по изменению цветового расстояния каждого из вариантов покрытий в камере за 30 сут, то в зависимости от типа эмали, цвета пигмента и климатической зоны его значения составят от 2 (эмаль ЭП-140 с пигментом красного цвета при экспонировании в сухом субтропическом климате) до 11 (эмаль ВЭ-69 с красным пигментом при экспонировании в умеренном климате).

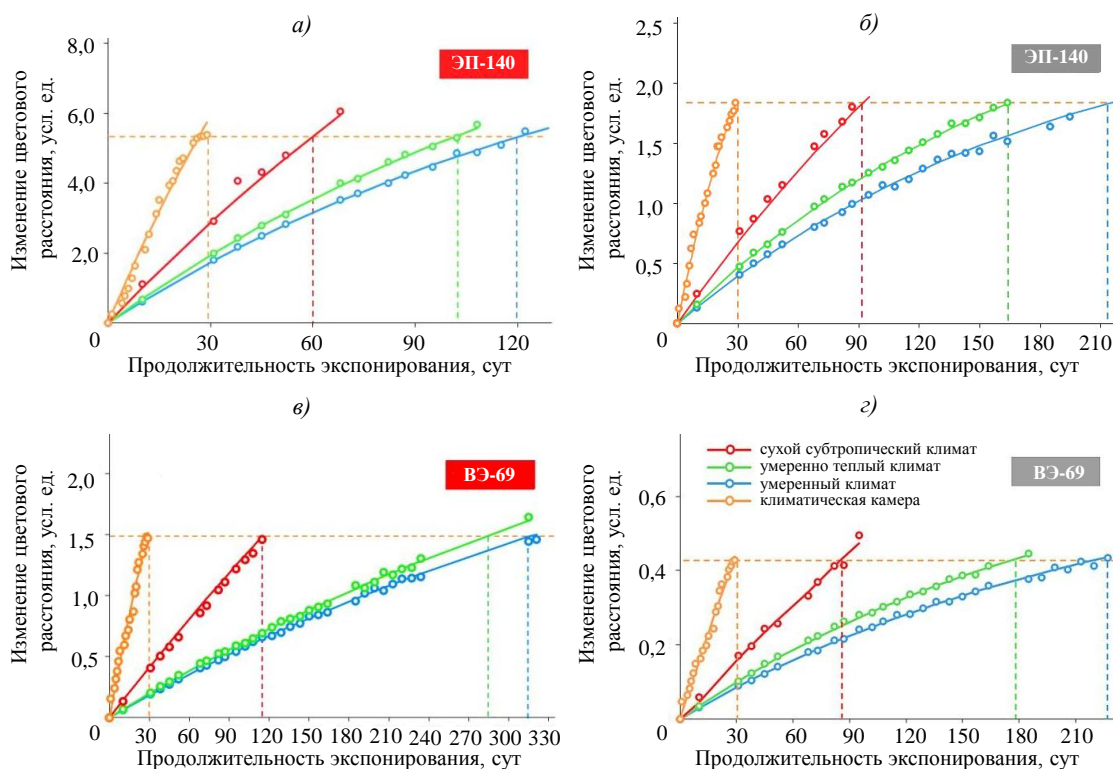


Рис. 3. Зависимости изменения цветового расстояния систем лакокрасочных покрытий на основе эмалей ЭП-140 (а, б) и ВЭ-69 (в, г) с добавлением пигментов красного (а, в) и серого (б, г) цвета от продолжительности экспонирования при натуральных и ускоренных климатических испытаниях: точки – экспериментальные данные, линии – модель (1)

Однако использование корреляционных зависимостей, рассчитанных на основании данных рис. 3, возможно лишь для анализа данных постфактум. Их применение для расчета режимов имитационных испытаний некорректно. Ранее выявлено [37], что изменение цветового расстояния при натурном экспонировании характеризуется выраженным эффектом сезонности, т. е. месяцем постановки на испытания.

На рис. 4, а показаны расчетные данные по изменению цветового расстояния системы ЛКП на основе эмали ЭП-140 с пигментом красного цвета при постановке на натурное экспонирование в начале первых месяцев сезонов года в умеренно теплом климате, а на рис. 4, б – соответствующие корреляционные зависимости, полученные с учетом данных по изменению цвета в климатической камере. Видно, что значение коэффициента ускорения старения за 30 дней экспонирования в климатической камере составляет 2,3 для летнего сезона, 4,1 – для весеннего, 5,5 – для зимнего, 8,1 – для осеннего сезона. Таким образом, для достоверного временного прогноза изменения цветового расстояния систем ЛКП в натуральных условиях по результатам лабораторных данных требуются предварительные сведения о сезонности изменения показателя в натуральных условиях, т. е. необходимо проведение двухлетних предварительных натуральных испытаний – экспонирование в течение 12 мес. со смещением постановки в 1 мес. Это лишает данный подход возможности практического использования.

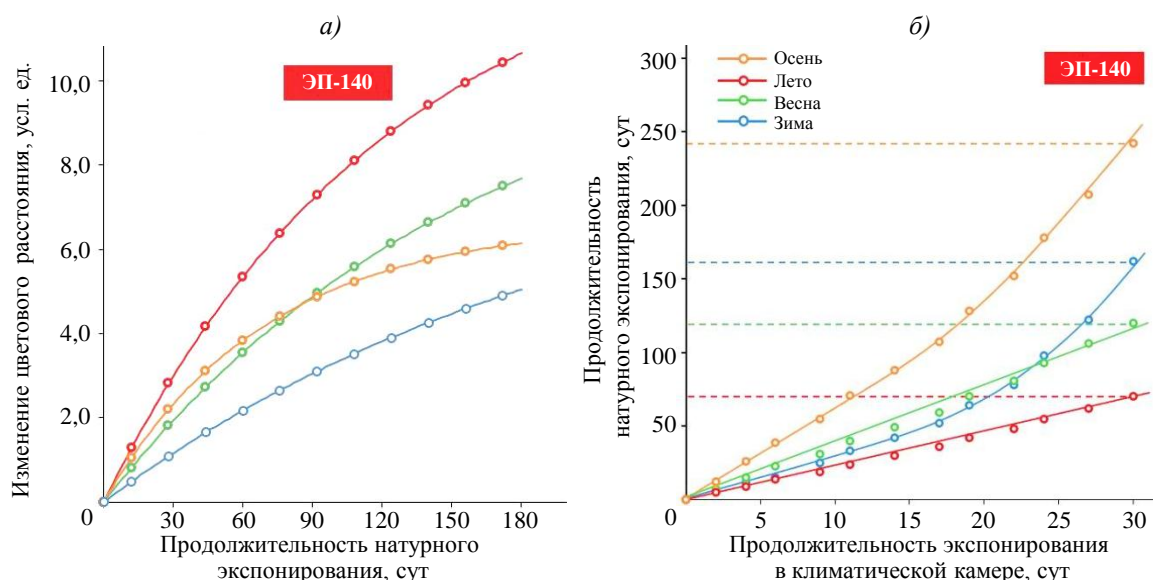


Рис. 4. Зависимости изменения цветового расстояния (расчетные значения) системы лакокрасочных покрытий на основе эмали ЭП-140 с добавлением пигмента красного цвета от продолжительности натурального экспонирования (а; точки – экспериментальные данные, линии – модель (1)); корреляционные зависимости между продолжительностью экспонирования в климатической камере и умеренно теплом климате (б; точки – расчетные значения при шаге изменения цветового расстояния 0,5, линии – аппроксимация полиномом первой (весна, лето) и второй (осень, зима) степени)

Более практически значимым и рациональным является исследование зависимости изменения цветового расстояния от накопленной дозы солнечной радиации. На рис. 5 приведены зависимости изменения цветового расстояния от суммарной дозы солнечной радиации образцов из алюминиевого сплава с нанесенными системами ЛКП при экспонировании в умеренном, умеренно теплом, сухом субтропическом климате, а также в лабораторных условиях в климатической камере.

При экспонировании в натуральных и лабораторных условиях характер изменения цветового расстояния систем ЛКП с добавлением пигментов серого цвета одинаков: при достижении накопленной дозы солнечной радиации 3500 МДж/м² изменение цветового расстояния при всех видах климатических воздействий находится в диапазоне 15–20 %.

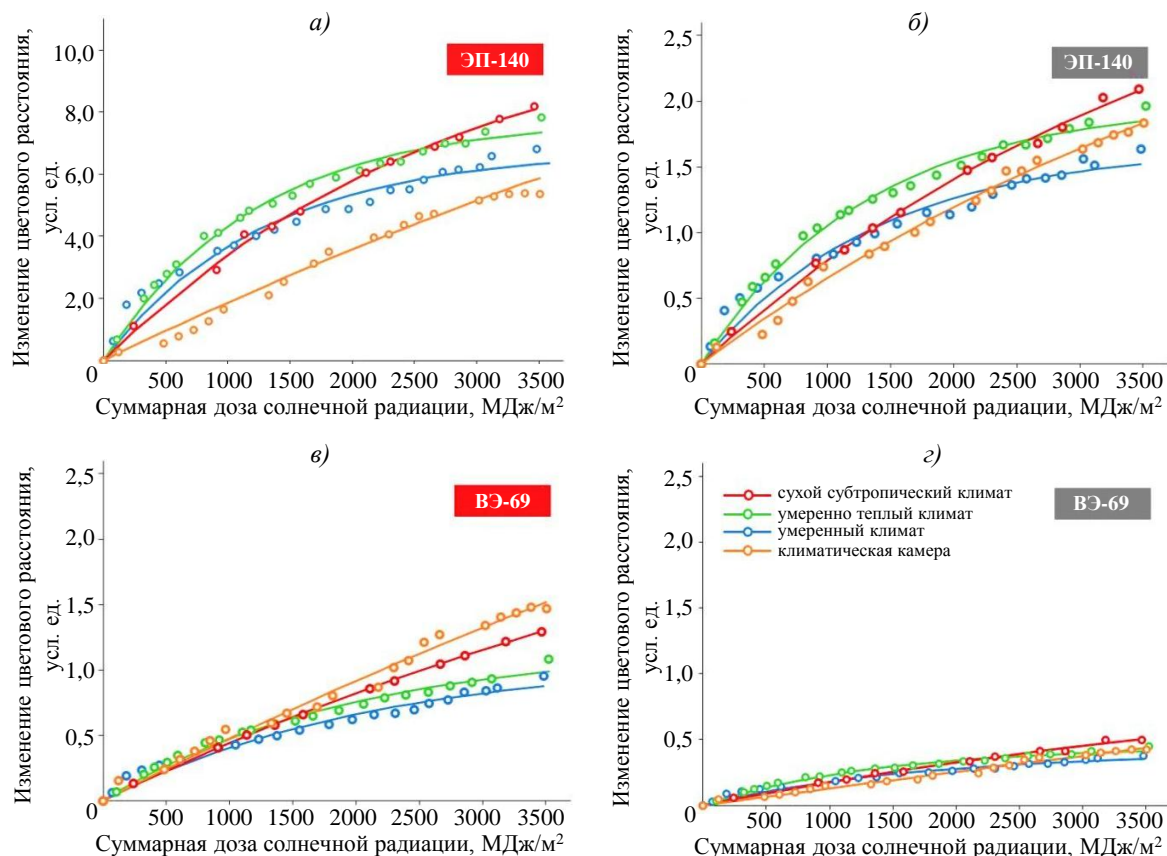


Рис. 5. Зависимости изменения цветового расстояния систем лакокрасочных покрытий на основе эмалей ЭП-140 (а, б) и ВЭ-69 (в, г) с добавлением пигментов красного (а, в) и серого (б, г) цвета от суммарной дозы солнечной радиации при натуральных и ускоренных климатических испытаниях: точки – экспериментальные данные, линии – модель (2)

Для систем ЛКП с добавлением красного пигмента наблюдается некоторая неэквивалентность натуральных и лабораторных климатических воздействий на изменения цветового расстояния. Изменение цветового расстояния эмали ЭП-140 составляет 6,85–8,15 усл. ед. при натурном экспонировании в трех климатических зонах, а при лабораторных климатических испытаниях достигает 5,3 усл. ед., т. е. на 35 % меньше. Для системы ЛКП на основе эмали ВЭ-69 наблюдается обратная картина: изменение цветового расстояния при натуральных воздействиях составляет 0,95–1,29 усл. ед., а при экспонировании в климатической камере достигает 1,48 усл. ед. (на 15 % больше).

На рис. 6 приведены корреляционные зависимости между суммарными дозами солнечной радиации в климатической камере и при натуральных испытаниях, рассчитанные по изменению цветового расстояния изученных систем ЛКП. Для сухого субтропического климата зависимость является линейной и повышение степени полинома не увеличивает значение коэффициента детерминации ($R^2 \geq 0,99$). Корреляционные

зависимости для умеренного и умеренно теплого климата аппроксимируются полиномом второй степени с коэффициентами детерминации $R^2 \geq 0,99$, повышение степени полинома не влияет на значение R^2 .

Полученные данные об изменении цветового расстояния при натуральных и лабораторных испытаниях, а также корреляционные кривые зависимостей между дозами радиации в климатической камере и при натурном экспонировании можно использовать при расчете сроков лабораторного экспонирования в климатической камере для проведения высокоточных имитационных климатических испытаний систем ЛКП на начальной стадии старения с учетом сезона, при котором начаты натурные климатические испытания.

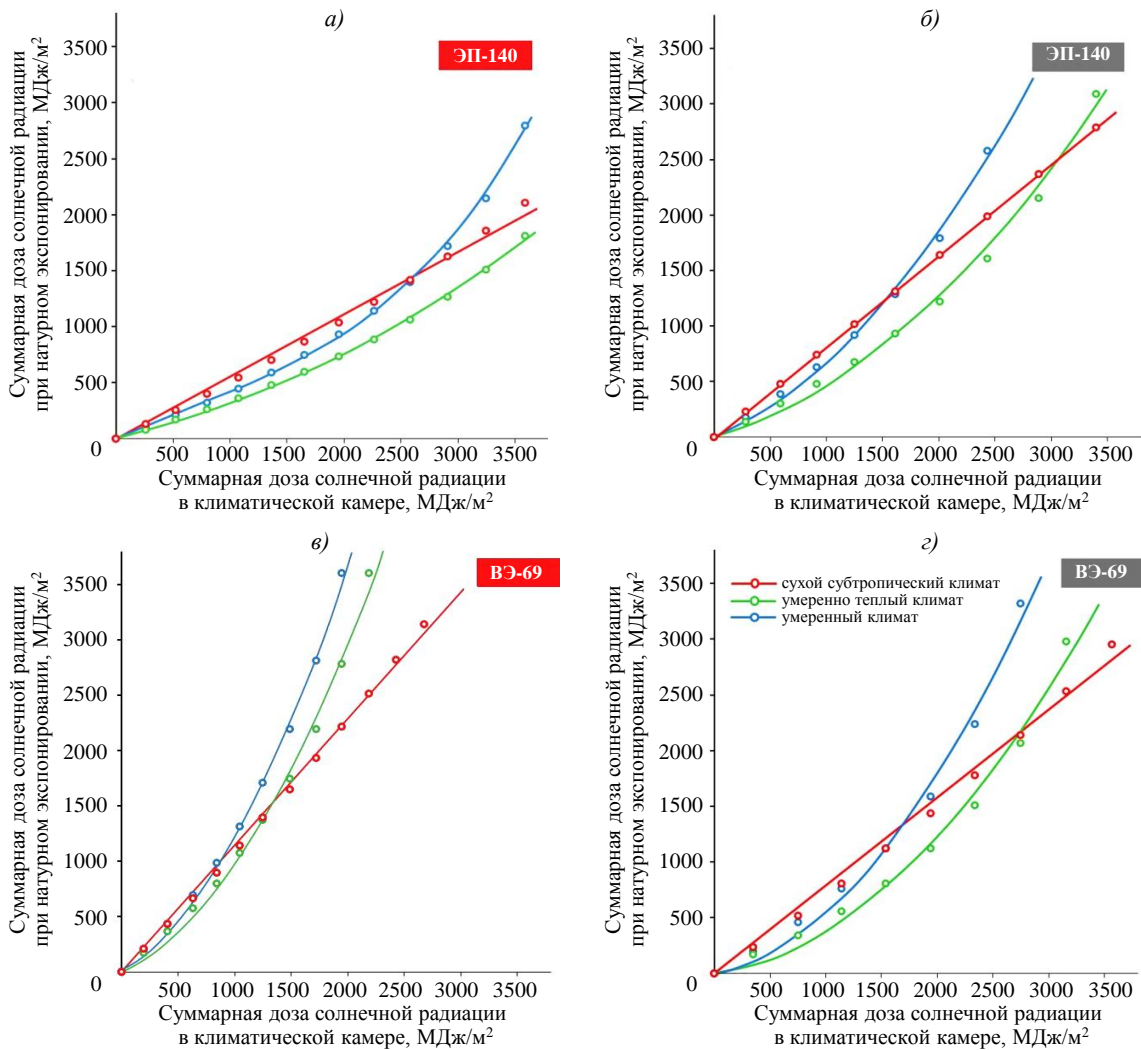


Рис. 6. Корреляционные зависимости между суммарными дозами солнечной радиации в климатической камере и при натуральных испытаниях для систем лакокрасочных покрытий на основе эмалей ЭП-140 (а, б) и ВЭ-69 (в, г) с добавлением пигментов красного (а, в) и серого (б, г) цвета: линии – аппроксимация полиномом (см. текст)

В таблице указаны среднемесячные значения с доверительной вероятностью 0,9 дозы солнечной радиации в весенний сезон, рассчитанные на основе регистрируемых данных на метеостанции Московского центра климатических испытаний им. Г.В. Акимова в течение 5 лет (2020–2024 гг.). Видно, что разброс среднемесячной

дозы солнечной радиации может составлять от 10 до 21 % в зависимости от года и не превышает 4 % (1489 ± 60 МДж/м²) за весь сезон по данным 5 лет наблюдений. Аналогичные данные получены и для других сезонов. Это позволяет прогнозировать изменения цветового расстояния при натуральных испытаниях до достижения накопленной дозы солнечной радиации ~ 3500 МДж/м², что для климатических районов Российской Федерации соответствует сроку от 8 мес. (в теплом влажном климате) до 14 мес. (в арктическом климате). Для учета сезонной неэквивалентности при расчетах можно использовать данные ГОСТ 16350–80 по достижению среднегодовой дозы солнечной радиации (рис. 7) либо усредненные (за период не менее 5 лет) данные с метеостанции в месте натурального экспонирования.

Ежемесячные показатели солнечной радиации в весенний сезон в умеренном климате за 2020–2024 гг.

Период	Доза солнечной радиации, МДж/м ²					средняя
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	
Март	323	329	406	251	371	336±72
Апрель	570	542	408	499	467	479±75
Май	585	666	703	696	720	694±66
Весенний сезон	1478	1447	1517	1446	1558	1489±60

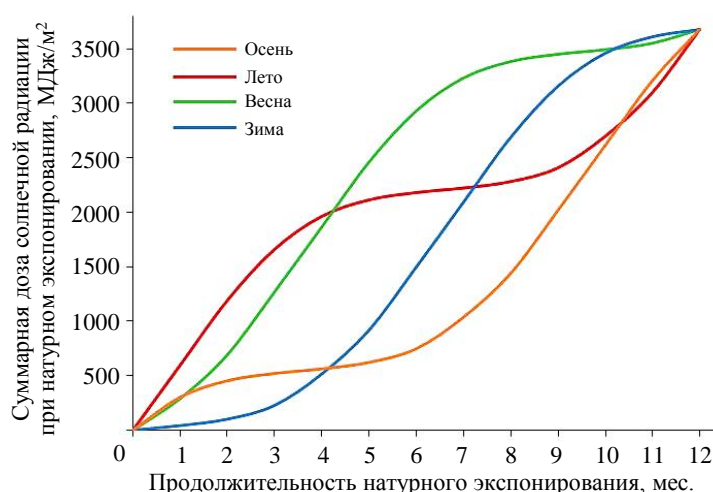


Рис. 7. Кривые достижения среднегодовой дозы солнечной радиации в умеренном климате (ГОСТ 16350–80) при начале экспонирования в разные сезоны года

Например, требуется определить длительность лабораторных испытаний систем ЛКП на основе эмали ЭП-140 с пигментом красного цвета для имитации натурального экспонирования в условиях умеренного климата в течение 6 мес. с учетом сезонности. Используя данные рис. 6 и 7 в аналитическом виде, можно рассчитать, что доза солнечной радиации при натурном экспонировании достигнет 1496, 2928, 2179 и 747 МДж/м² в зимний, весенний, летний и осенний сезоны соответственно, а срок экспонирования в климатической камере при этом составит 21, 31, 27 и 14 сут.

Полученные результаты позволяют существенно уточнить расчет продолжительности лабораторных имитационных испытаний на начальной стадии старения систем ЛКП, при этом будет учтен эффект сезонности изменения цветовых показателей.

Заключения

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

- коэффициенты ускорения старения систем ЛКП при экспонировании в лабораторных условиях составляют 2–11 в зависимости от типа ЛКП и климатических зон при натурном экспонировании;
- корреляционные зависимости между сроками натурального и лабораторного экспонирования не позволяют дать достоверный временной прогноз изменения цветового состояния систем ЛКП в натуральных условиях по результатам его измерения в лабораторных условиях из-за эффекта сезонности;
- корреляционные зависимости между дозами солнечной радиации в натуральных и лабораторных условиях позволяют существенно уточнить расчет продолжительности лабораторных имитационных испытаний на начальной стадии старения систем ЛКП и учесть эффект сезонности изменения цветовых показателей.

Список источников

1. Cornet A.J., Homborg A.M., Anusuyadevi P.R. et al. Unravelling corrosion degradation of aged aircraft components protected by chromate-based coatings // *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 159. Art. 108070.
2. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2023. Vol. 36. No. 4. P. 1–35.
3. Huang H., Guo H., Feng Y. Study on UV-aging performance of fluorinated polymer coating and application on painted muds // *Materials Research Express*. 2021. Vol. 8. No. 1. Art. 015301.
4. Cai G., Wang H., Jiang D., Dong Z. Degradation of fluorinated polyurethane coating under UVA and salt spray. Part I: Corrosion resistance and morphology // *Progress in Organic Coatings*. 2018. Vol. 123. P. 337–349.
5. Cai G., Zhang D., Jiang D., Dong Z. Degradation of fluorinated polyurethane coating under UVA and salt spray. Part II: Molecular structures and depth profile // *Progress in Organic Coatings*. 2018. Vol. 124. P. 25–32.
6. Лебедев М.П., Старцев О.В., Коваль Т.В., Велигодский И.М. Мультиплетные релаксационные α -переходы во фторуретановом покрытии после климатического старения // *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2024. Т. 516. № 1. С. 45–51.
7. Исупов В.В., Старцев О.В. Численные методы в динамической механической спектроскопии полимеров // *Математические модели и численные методы механики сплошных сред: тез. докл. Междунар. конф., посвященной 75-летию выдающегося математика и механика, организатора науки акад. Н.Н. Яненко / под ред. Ю.И. Шокина*. Новосибирск: Из-дво СО РАН, 1996. С. 293–294.
8. Старцев О.В., Перепечко И.И. Молекулярная подвижность и релаксационные процессы в эпоксидной матрице композита. 1. Влияние типа армирующего наполнителя // *Механика композитных материалов*. 1984. № 3. С. 387–391.
9. Startsev V.O., Nizina T.A., Startsev O.V. A colour criterion of the climatic ageing of an epoxy polymer // *International Polymer Science and Technology*. 2016. Vol. 43. No. 8. P. 45–48.
10. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012. No. 4. P. 323–329.
11. Dexter H.B. Long-term environmental effects and flight service evaluation of composite materials: technical report TM-89067. NASA, 1987. 188 p.
12. Каблов Е.Н., Лебедев М.П., Старцев О.В., Голиков Н.И. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур // *Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD-2013*. Якутск, 2013. С. 5–7.

13. Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // Известия Алтайского государственного университета. 2020. № 1 (111). С. 41–51.
14. Malshe V.C., Waghoo G. Weathering study of epoxy paints // Progress in Organic Coatings. 2004. Vol. 51. No. 4. P. 267–272.
15. Cocuzzi D.A., Pilcher G.R. Ten-year exterior durability test results compared to various accelerated weathering devices: Joint study between ASTM International and National Coil Coatings Association // Progress in Organic Coatings. 2013. Vol. 76. P. 979–984.
16. Павлов А.В., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Меркулова Ю.И. Климатические испытания лакокрасочного покрытия на основе фторопласта и особенности его деструкции // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-103-110.
17. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2013. № 12. С. 6–18.
18. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 2. Новые подходы к оценке коррозивности приморских атмосфер // Коррозия: материалы, защита. 2016. № 1. С. 1–15.
19. Старцев О.В., Ярмолинец Л.В., Руднев В.П., Цинцадзе Г.Б. Прогнозирование светопропускания органического стекла при климатическом старении // Авиационная промышленность. 1990. № 2. С. 64–65.
20. Старцев О.В., Цинцадзе Г.Б., Вапиров Ю.М., Кирюшкин С.Г. Климатическое старение прозрачных термопластичных пленок. 1. Полиэтилен // Полимерные оптические материалы / под ред. Б.Р. Смирнова. Черногоровка: Изд-во ИХФ АН СССР, 1989. С. 152–177.
21. Старцев О.В. Климатическое старение прозрачных термопластичных пленок. 2. Поликарбонат // Полимерные оптические материалы / под ред. Б.Р. Смирнова. Черногоровка: ИХФ АН СССР, 1989. С. 178–197.
22. Momber A.W., Buchbach S., Plagemann P., Marquardt T. Edge coverage of organic coatings and corrosion protection over edges under simulated ballast water tank conditions // Progress in Organic Coatings. 2017. Vol. 108. P. 90–92.
23. Pélissier K., Le Bozec N., Thierry D., Larché N. Evaluation of the Long-Term Performance of Marine and Offshore Coatings System Exposed on a Traditional Stationary Site and an Operating Ship and Its Correlation to Accelerated Test // Coatings. 2022. Vol. 12. No. 11. P. 1758.
24. Bierwagen G.P., He L., Li J. et al. Studies of a new accelerated evaluation method for coating corrosion resistance – thermal cycling testing // Progress in Organic Coatings. 2000. Vol. 39. No. 1. P. 67–78.
25. Knudsen O.Ø., Skilbred A.W.B., Løken A. et al. Correlations between standard accelerated tests for protective organic coatings and field performance // Materials Today Communications. 2022. Vol. 31. Art. 103729.
26. Revin P.O., Makarenko A.V., Harisov R.A., Farhetdinov I.R. Research of underwater applied coatings for corrosion protection of port facilities // Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2022. Vol. 12. No. 4. P. 385–393.
27. LeBozec N., Thierry D., Le Calvé P. et al. Performance of marine and offshore paint systems: Correlation of accelerated corrosion tests and field exposure on operating ships // Materials and Corrosion. 2015. Vol. 66. No. 3. P. 215–225.
28. Li S., Bi H., Weinell C.E., Dam-Johansen K. A quantitative real-time evaluation of rust creep propagation in coating systems exposed to field testing and cyclic ageing test // Progress in Organic Coatings. 2023. Vol. 184. Art. 107866.
29. Saha J.K., Mitra P.K., Paul S., Singh D.D.N. Performance of different organic coatings on steel substrate by accelerated and in atmospheric exposure tests // Indian Journal of Chemical Technology. 2010. Vol. 17. No. 2. P. 102–110.
30. Chu M.T., Do D.T., Sereda V.N., Karpov V.A. Correlation between climate testing methods and service life prediction for paint systems // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2023. Vol. 12. No. 3. P. 1363–1373.

31. Gao J., Hu W., Wang R., Li X. Study on a multifactor coupling accelerated test method for anticorrosive coatings in marine atmospheric environments // *Polymer Testing*. 2021. Vol. 100. Art. 107259.
32. Кузнецова В.А., Шаповалов Г.Г., Марченко С.А., Коврижкина Н.А., Силаева А.А. Матовые покрытия на основе двухфазной эпоксидно-акриловой композиции для окраски элементов кабины пилотов и панелей приборов // *Труды ВИАМ*. 2020. № 12 (94). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-87-95.
33. 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 <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
34. Козлова А.А., Кузнецова В.А., Козлов И.А., Наприенко С.А., Силаева А.А. Влияние длительных нагревов на свойства защитных покрытий для алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 74–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-74-80.
35. Старцев В.О., Валева Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (95). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
36. Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 2. Влияние различных климатических зон // *Труды ВИАМ*. 2025. № 6 (148). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-86-97.
37. Старцев В.О., Коган А.М., Зеленева Т.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 1. Влияние длительных сроков экспонирования на цветовые показатели // *Труды ВИАМ*. 2025. № 5 (147). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-99-111.
38. Старцев В.О., Низина Т.А. Прогнозирование климатического старения эпоксидных полимеров по изменению цветовых показателей // *Труды ВИАМ*. 2015. № 12. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-10-10.

References

1. Cornet A.J., Homborg A.M., Anusuyadevi P.R. et al. Unravelling corrosion degradation of aged aircraft components protected by chromate-based coatings. *Engineering Failure Analysis*, 2024, vol. 159, art. 108070.
2. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 36, no. 4, pp. 1–35.
3. Huang H., Guo H., Feng Y. Study on UV-aging performance of fluorinated polymer coating and application on painted muds. *Materials Research Express*, 2021, vol. 8, no. 1, art. 015301.
4. Cai G., Wang H., Jiang D., Dong Z. Degradation of fluorinated polyurethane coating under UVA and salt spray. Part I: Corrosion resistance and morphology. *Progress in Organic Coatings*, 2018, vol. 123, pp. 337–349.
5. Cai G., Zhang D., Jiang D., Dong Z. Degradation of fluorinated polyurethane coating under UVA and salt spray. Part II: Molecular structures and depth profile. *Progress in Organic Coatings*, 2018, vol. 124, pp. 25–32.
6. Lebedev M.P., Startsev O.V., Koval T.V., Veligodskii I.M. Multiplet relaxation α -transitions in a fluororethane coating after climatic aging. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Khimiya, nauki o materialakh*, 2024, vol. 516, no. 1, pp. 45–51.
7. Isupov V.V., Startsev O.V. Numerical methods in dynamic mechanical spectroscopy of polymers. *Mathematical models and numerical methods of continuum mechanics: reports Int. conf. dedicated to the 75th anniversary of the outstanding mathematician and mechanic, organizer of science academician N.N. Yanenko*. Ed. Yu.I. Shokin. Novosibirsk: Publ. SB RAS, 1996, pp. 293–294.

8. Startsev O.V., Perepechko I.I. Molecular mobility and relaxation processes in the epoxy matrix of a composite. 1. Influence of the type of reinforcing filler. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1984, no. 3, pp. 387–391.
9. Startsev V.O., Nizina T.A., Startsev O.V. A colour criterion of the climatic ageing of an epoxy polymer. *International Polymer Science and Technology*, 2016, vol. 43, no. 8, pp. 45–48.
10. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, no. 4, pp. 323–329.
11. Dexter H.B. *Long-term environmental effects and flight service evaluation of composite materials*: technical report TM-89067. NASA, 1987, 188 p.
12. Kablov E.N., Lebedev M.P., Startsev O.V., Golikov N.I. Climatic tests of materials, structural elements, machinery and equipment in conditions of extremely low temperatures. *Proceedings of the VI Eurasian Symposium on the Problems of Strength of Materials and Machines for Cold Climate Regions EURASTRENCOLD–2013*, Yakutsk, 2013, pp. 5–7.
13. Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Aging of polymer composite materials in conditions of extremely cold climate. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 1 (111), pp. 41–51.
14. Malshe V.C., Waghoo G. Weathering study of epoxy paints. *Progress in Organic Coatings*, 2004, vol. 51, no. 4, pp. 267–272.
15. Cocuzzi D.A., Pilcher G.R. Ten-year exterior durability test results compared to various accelerated weathering devices: Joint study between ASTM International and National Coil Coatings Association. *Progress in Organic Coatings*, 2013, vol. 76, pp. 979–984.
16. Pavlov A.V., Andreeva N.P., Pavlov M.R., Merkulova Yu.I. Climatic tests of paint coating based on fluoroplastic and features of its destruction. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-103-110.
17. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M., Panin S.V. Corrosive aggressiveness of the coastal atmosphere. Part 1. Influencing factors (review). *Korroziya: materialy, zashchita*, 2013, no. 12, pp. 6–18.
18. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Corrosive aggressiveness of the coastal atmosphere. Part 2. New approaches to assessing the corrosivity of coastal atmospheres. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2016, no. 1, pp. 1–15.
19. Startsev O.V., Yarmolynets L.V., Rudnev V.P., Tsintsadze G.B. Forecasting the light transmission of organic glass during climatic aging. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1990, no. 2, pp. 64–65.
20. Startsev O.V., Tsintsadze G.B., Vapirov Yu.M., Kiryushkin S.G. Climatic aging of transparent thermoplastic films. 1. Polyethylene. *Polimernye opticheskie materialy*. Ed. B.R. Smirnov. Chernogolovka: Publ. house of the Institute of Chemical Physics of the USSR Academy of Sciences, 1989, pp. 152–177.
21. Startsev O.V. Climatic aging of transparent thermoplastic films. 2. Polycarbonate. *Polimernye opticheskie materialy*. Ed. B.R. Smirnov. Chernogolovka: Institute of Chemical Physics of the USSR Academy of Sciences, 1989, pp. 178–197.
22. Momber A.W., Buchbach S., Plagemann P., Marquardt T. Edge coverage of organic coatings and corrosion protection over edges under simulated ballast water tank conditions. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol. 108, pp. 90–92.
23. Pélissier K., Le Bozec N., Thierry D., Larché N. Evaluation of the Long-Term Performance of Marine and Offshore Coatings System Exposed on a Traditional Stationary Site and an Operating Ship and Its Correlation to Accelerated Test. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 11, p. 1758.
24. Bierwagen G.P., He L., Li J. et al. Studies of a new accelerated evaluation method for coating corrosion resistance – thermal cycling testing. *Progress in Organic Coatings*, 2000, vol. 39, no. 1, pp. 67–78.
25. Knudsen O.Ø., Skillbred A.W.B., Løken A. et al. Correlations between standard accelerated tests for protective organic coatings and field performance. *Materials Today Communications*, 2022, vol. 31, art. 103729.
26. Revin P.O., Makarenko A.V., Harisov R.A., Farhetdinov I.R. Research of underwater applied coatings for corrosion protection of port facilities. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 385–393.

27. LeBozec N., Thierry D., Le Calvé P. et al. Performance of marine and offshore paint systems: Correlation of accelerated corrosion tests and field exposure on operating ships. *Materials and Corrosion*, 2015, vol. 66, no. 3, pp. 215–225.
28. Li S., Bi H., Weinell C.E., Dam-Johansen K. A quantitative real-time evaluation of rust creep propagation in coating systems exposed to field testing and cyclic ageing test. *Progress in Organic Coatings*, 2023, vol. 184, art. 107866.
29. Saha J.K., Mitra P.K., Paul S., Singh D.D.N. Performance of different organic coatings on steel substrate by accelerated and in atmospheric exposure tests. *Indian Journal of Chemical Technology*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 102–110.
30. Chu M.T., Do D.T., Sereda V.N., Karpov V.A. Correlation between climate testing methods and service life prediction for paint systems. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2023, vol. 12, no. 3, pp. 1363–1373.
31. Gao J., Hu W., Wang R., Li X. Study on a multifactor coupling accelerated test method for anticorrosive coatings in marine atmospheric environments. *Polymer Testing*, 2021, vol. 100, art. 107259.
32. Kuznetsova V.A., Shapovalov G.G., Marchenko S.A., Kovrizhkina N.A., Silaeva A.A. Paint coatings on the basis of epoxy and acrylic diphasic polymeric system for coloring of elements of cabin of pilots and dashboards. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-87-95.
33. 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: March 10, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
34. Kozlova A.A., Kuznetsova V.A., Kozlov I.A., Naprienko S.A., Silaeva A.A. The effect of prolonged heating on the properties of protective coatings for aluminum alloy system Al–Si–Mg. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 74–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-74-80.
35. Startsev V.O., Valevin E.O., Gulyaev A.I. The influence of polymer composite materials' surface weathering on its mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
36. Startsev V.O. Climate aging of paint coating systems. Part 2. Influence of different climatic zones. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 06, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-86-97.
37. Startsev V.O., Kogan A.M., Zeleneva T.O. Climate aging of paint coating systems. Part 1. Effect of long-term exposure on color characteristics. *Trudy VIAM*, 2025, no. 5 (147), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 19, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-99-111.
38. Startsev V.O., Nizina T.A. The modeling of epoxy polymers weathering by the color characteristics measurements. *Trudy VIAM*, 2015, no. 12, paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-10-10.

Информация об авторах

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Valery O. Startsev, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.03.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.03.2025.
The article was submitted 26.03.2025; approved and accepted for publication after reviewing 31.03.2025.