

Научная статья

УДК 667.6:535.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-99-111

КЛИМАТИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ СИСТЕМ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ Часть 1. Влияние длительных сроков экспонирования на цветовые показатели

В.О. Старцев¹, А.М. Коган¹, Т.О. Зеленева¹

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

Аннотация. Представлены сведения об изменении цветового расстояния и достоверная прогнозная модель этого процесса при натурном экспонировании систем лакокрасочных покрытий в течение 7 лет в умеренно теплом климате. Выявлено, что эффект сезонности, обнаруженный ранее при экспонировании в течение 1 года, уменьшается после 3,5 лет и не наблюдается после 5 лет экспонирования. Доказано, что возможно достоверное прогнозирование изменения цветовых характеристик на срок до 7 лет после анализа экспериментальных данных, полученных при натурном экспонировании в течение 5 лет.

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

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-99-111.

Scientific article

CLIMATE AGING OF PAINT COATING SYSTEMS Part 1. Effect of long-term exposure on color characteristics

V.O. Startsev¹, A.M. Kogan¹, T.O. Zeleneva¹

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 provides information on the change in color distance and a reliable forecast model for this process during natural exposure of paint coating systems for 7 years in a moderately warm climate. It is revealed that the seasonality effect, previously detected based on data for 1 year of exposure, decreases after 3,5 years and is not observed after 5 years of exposure. It is proven that it is possible to reliably forecast changes in color characteristics for up to 7 years after analyzing experimental data for 5 years of natural exposure.

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

For citation: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-99-111.

Введение

Системы лакокрасочных покрытий (ЛКП) широко применяются для защиты материалов от внешних факторов. Разрабатываются эрозионностойкие ЛКП авиационного назначения на основе эпоксидных и полиуретановых пленкообразователей [1], эластомерные эрозионностойкие радиопрозрачные ЛКП [2]. Исследуются влияние искусственного старения на адгезию и декоративные свойства систем покрытий [3], топливо- и водостойкость покрытий [4], а также параметры отверждения и защитная способность систем покрытий для окраски внешней поверхности авиационной техники [5]. Старение поверхности существенно влияет на механические свойства полимерных композиционных материалов [6, 7], что также требует применения систем ЛКП.

Ранее проведен ряд работ с целью прогнозирования климатического старения эпоксидных полимеров по изменению цветовых показателей [8, 9], в том числе проанализировано влияние актинометрических параметров на цветовые характеристики [10]. В работе [11] изучено влияние сезонности климатического воздействия на изменение цветовых характеристик эпоксидной эмали при экспонировании в течение 1 года в открытых климатических условиях.

В результате многолетних исследований [12, 13] выявлены и подробно охарактеризованы факторы, ухудшающие состояние ЛКП в открытых климатических условиях. Механические, декоративные и защитные свойства покрытий ухудшаются под влиянием кислорода воздуха, действие которого усиливается при воздействии температуры, влаги и солнечного излучения [14, 15]. Если в пленкообразующих содержатся или накапливаются группы, способные реагировать с кислородом, то в начальный период старения может происходить присоединение кислорода с образованием пероксидов и гидропероксидов. Как следствие, повышается вероятность разрыва макромолекул, отрыва боковых фрагментов цепей, удаления продуктов деструкции. В результате изменяются теплостойкость, эластичность, адгезия к защищаемым поверхностям изделий и декоративные показатели покрытий [14–16].

Состояние ЛКП, находящихся в натуральных климатических условиях, сущность эффектов дополимеризации, фотоокисления, состав продуктов деструкции, гидролиза и других молекулярных превращений исследуются с использованием таких физических методов, как инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье, конфокальная рамановская спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия, совмещенная с энергодисперсионным рентгеновским анализом, атомно-силовая спектроскопия, электрохимическая импедансная спектроскопия [17–20]. Эффективность использования наполнителей [21], пластификаторов, стабилизаторов [22] для повышения атмосферостойкости пленкообразующих покрытий анализируют по данным термомеханического анализа [23], динамического механического анализа [15, 22, 24, 25], наноиндентирования [26].

Однако доминирующая роль в получении информации о старении ЛКП в открытых климатических условиях принадлежит методам колориметрии [16, 27, 28]. Цветовые характеристики чрезвычайно чувствительны к самым первым молекулярным превращениям в пленкообразующих [29] и перспективны для учета сезонных колебаний температуры, влажности и солнечной радиации в открытых климатических условиях [30].

По данным работы [31], изменение цветового расстояния ΔE серии ЛКП, подвергнутых экспонированию в течение 10 лет в климатических условиях штатов Флорида и Аризона, носило отчетливо выраженный нелинейный характер. Существенное пожелтение эпоксидных красок на основе диглицидиловых эфиров с различными

бисфенолами и отвердителями происходило в условиях окружающей среды в г. Мумбаи (Индия) [32]. Изменение цвета сопровождалось деструкцией и выветриванием. Подобным образом возрастание ΔE в условиях открытой атмосферы жаркого и влажного климата [33] сопровождалось ухудшением механических характеристик силиконовых эластомеров.

Результаты исследования немонотонных изменений цветовых показателей эпоксидных систем и их зависимость от условий испытаний представлены в монографии [34]. Агрессивность атмосферы изменяется в широких пределах в разные сезоны года [35, 36], цветовые показатели ЛКП чувствительны к сезонным колебаниям температуры, интенсивности и дозе солнечной радиации, концентрации воздушных аэрозолей [37, 38].

Цель данной работы – исследование влияния длительных сроков экспонирования (до 7 лет) в условиях умеренно теплого климата на цветовые показатели системы ЛКП, а также возможность их достоверного прогнозирования.

Материалы и методы

Результаты работы [11] уточнены и существенно дополнены с помощью новых экспериментальных данных. Для испытаний использовали образцы из стали Ст.3 (ГОСТ 380–2005) с системой ЛКП оранжевого цвета, состоящей из одного слоя эпоксидной грунтовки ЭП-076 (25–30 мкм) и двух слоев эпоксидной эмали ЭП-140 (50–60 мкм). Отверждение грунтовки и эмалей проводили при комнатной температуре. Перед нанесением покрытия образцы предварительно обезжирены бензином (нефрасом), торцы окрашены грунтовкой ЭП-076. Испытания образцов проводили в натуральных климатических условиях в соответствии с ГОСТ 9.906–83 и ГОСТ 9.909–86 в ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова – НИЦ «Курчатовский институт».

Первые два образца выставили на испытания в июне 2015 г., затем по июнь 2016 г. в начале каждого месяца выставляли по два дополнительных образца. Изменение цветового расстояния ΔE в цветовом пространстве CIE L*a*b* [39–41] системы ЛКП для каждого образца измеряли еженедельно в течение первых 3 мес. и далее ежемесячно до срока экспонирования 1 год. В первый год натуральных испытаний для каждого образца получено 21 экспериментальное значение изменения цветового расстояния. Полученные данные аппроксимировали с помощью модели

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

где ΔE_{\max} – предельное значение цветового расстояния, усл. ед.; t – продолжительность экспонирования, сут; τ – параметр, характеризующий срок достижения $0,63\Delta E_{\max}$, сут.

Для изучения влияния длительных сроков экспонирования измерение цветового расстояния и расчет параметров модели (1) дополнительно проводили после 3,5; 5; 6 и 7 лет экспонирования в открытых условиях.

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

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены графики изменения цветового расстояния исследованных образцов в первый год экспонирования, в табл. 1 – рассчитанные параметры модели (1).

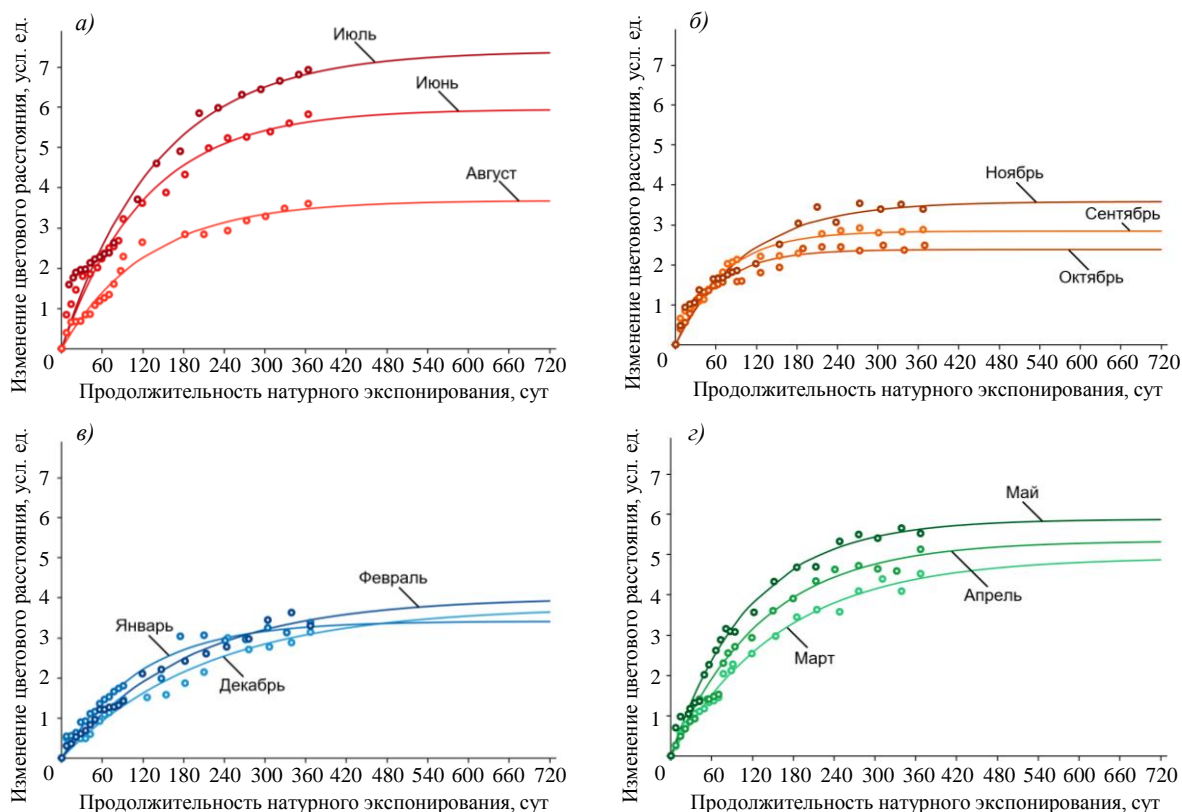


Рис. 1. Изменение цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эпоксидной эмали ЭП-140 при постановке на натурные испытания летом (а), осенью (б), зимой (в) и весной (з): точки – экспериментальные данные, линии – модель (1)

Анализ полученных экспериментальных данных и результатов моделирования (рис. 1 и табл. 1) подтверждает наличие ярко выраженного эффекта сезонности, полученного в работе [11].

Таблица 1

Параметры модели (1) по данным первого года натурального экспонирования

Месяц начала экспонирования	Предельное значение цветового расстояния ΔE_{\max} , усл. ед.	Срок достижения $0,63E_{\max}$, сут	Среднеквадратичная ошибка MSE	Коэффициент детерминации R^2
Июнь	5,96	124	0,07	0,98
Июль	7,40	142	0,12	0,97
Август	3,68	126	0,03	0,97
Сентябрь	2,85	70	0,03	0,97
Октябрь	2,39	63	0,02	0,96
Ноябрь	3,59	105	0,06	0,96
Декабрь	3,78	214	0,04	0,96
Январь	3,42	115	0,03	0,97
Февраль	4,01	186	0,02	0,99
Март	4,93	163	0,02	0,99
Апрель	5,34	135	0,06	0,98
Май	5,88	116	0,04	0,99

Диапазон максимального изменения ΔE_{\max} образцов, выставленных на экспонирование в летние и весенние месяцы, составляет 3,68–7,40 усл. ед., в осенние и зимние месяцы: 2,39–4,01 усл. ед. Максимальное значение ΔE_{\max} достигается при начале экспонирования в июле (7,40 усл. ед.), минимальное – в октябре (2,39 усл. ед.). Общая разность значений ΔE_{\max} по результатам обработки экспериментальных данных за 1 год натурального экспонирования составляет 5,01 усл. ед. Модель адекватно описывает экспериментальные данные: среднеквадратичная ошибка составляет 0,02–0,12 при коэффициенте детерминации 0,96–0,99 (табл. 1).

Если обнаруженный эффект сезонности, т. е. существенного различия в изменении цветового расстояния в начале экспонирования в разное время года, сохраняется при дальнейшей экспозиции, то полученные параметры модели (1) по данным первого года экспонирования должны адекватно описывать и экспериментальные значения после 3,5; 5; 6 и 7 лет экспонирования. В табл. 2 приведены значения среднеквадратичной ошибки и коэффициента детерминации для первого месяца каждого времени года (июнь, сентябрь, декабрь, март) при вариации экспериментального набора данных. Видно, что использование параметров модели, полученных за 1 год экспонирования, при добавлении экспериментальных значений после 3,5; 5; 6 и 7 лет экспозиции среднеквадратичная ошибка монотонно увеличивается (от 0,04 до 2,94 для декабря), а коэффициент детерминации снижается (с 0,97 до 0,55 в сентябре). Таким образом, можно обоснованно утверждать, что экспериментальные данные, полученные за первый год экспонирования, нельзя использовать для дальнейшего прогноза изменения цветового расстояния. Если к экспериментальному набору данных за первый год экспонирования последовательно добавлять по одному значению цветового расстояния, то наблюдаются экспоненциальное уменьшение среднеквадратичной ошибки (цветные ячейки в табл. 2) и монотонный рост коэффициента детерминации R^2 . Важнейшим результатом анализа является тот факт, что после добавления экспериментальных данных, полученных при экспонировании в течение 5 лет, уменьшение ошибки модели становится практически нулевым. Это доказывает возможность достоверного моделирования цветового расстояния на длительные сроки с использованием данных, полученных при экспонировании в течение 5 лет.

Далее параметры модели (1) рассчитаны для экспериментальных данных, полученных после каждого съема образцов. Результаты приведены на рис. 2–5 и в табл. 3. Видно, что после 7 лет экспонирования среднеквадратичная ошибка модели не превышает 0,35, а коэффициент детерминации составляет 0,95–0,99. После 3,5 лет экспонирования параметры ΔE_{\max} и τ существенно изменяются по сравнению с расчетными характеристиками, полученными после 1 года экспонирования (табл. 1). Например, в декабре по данным первого года экспонирования ΔE_{\max} и τ составили 3,78 усл. ед. и 214 сут (табл. 1), а после 3,5 лет достигли 10,55 усл. ед. и 889 сут соответственно. После 5 лет экспонирования также наблюдается значительная коррекция этих параметров: в декабре их значения составляют 8,92 усл. ед. и 715 сут. После аппроксимации экспериментальных данных за 6 и 7 лет экспонирования их изменение становится незначительным. Сравнение параметра ΔE_{\max} показывает, что после 3,5 лет натурального экспонирования эффект сезонности значительно ослабевает, а после 5 лет практически не наблюдается. Изменение цветового расстояния ΔE_{\max} образцов после 7 лет экспонирования составляет $8 \pm 0,5$ усл. ед. Причем для образцов, выставленных в весенний, летний и зимний периоды, различия между экспериментальными данными не превышают 10 %, а между расчетными значениями – практически нулевые.

Таблица 2

Среднеквадратичная ошибка (MSE) и коэффициент детерминации (R^2) модели (1) при прогнозировании на разные сроки экспонирования

Месяц начала экспонирования	Продолжительность экспонирования*, годы	Значения параметров и ошибок модели при продолжительности экспонирования**, годы									
		1		3,5		5		6		7	
		MSE	R^2	MSE	R^2	MSE	R^2	MSE	R^2	MSE	R^2
Июнь	1	0,07	0,98	0,33	0,93	0,52	0,91	0,76	0,90	1,04	0,89
	3,5	–	–	0,19	0,97	0,21	0,97	0,25	0,97	0,33	0,97
	5	–	–	–	–	0,19	0,98	0,20	0,98	0,22	0,98
	6	–	–	–	–	–	–	0,20	0,98	0,21	0,98
	7	–	–	–	–	–	–	–	–	0,21	0,98
Сентябрь	1	0,03	0,97	0,62	0,64	1,20	0,57	1,75	0,55	2,30	0,54
	3,5	–	–	0,37	0,87	0,38	0,89	0,39	0,91	0,40	0,92
	5	–	–	–	–	0,36	0,91	0,35	0,93	0,34	0,94
	6	–	–	–	–	–	–	0,35	0,93	0,34	0,94
	7	–	–	–	–	–	–	–	–	0,34	0,94
Декабрь	1	0,04	0,96	0,75	0,76	1,43	0,76	2,16	0,77	2,94	0,79
	3,5	–	–	0,09	0,97	0,15	0,98	0,22	0,98	0,31	0,99
	5	–	–	–	–	0,10	0,98	0,10	0,98	0,10	0,99
	6	–	–	–	–	–	–	0,10	0,98	0,10	0,99
	7	–	–	–	–	–	–	–	–	0,10	0,99
Март	1	0,02	0,99	0,09	0,97	0,33	0,93	0,68	0,90	1,07	0,88
	3,5	–	–	0,09	0,98	0,14	0,96	0,31	0,95	0,52	0,94
	5	–	–	–	–	0,09	0,98	0,15	0,97	0,17	0,96
	6	–	–	–	–	–	–	0,13	0,98	0,16	0,97
	7	–	–	–	–	–	–	–	–	0,15	0,98

* Срок экспонирования, экспериментальные данные за который использованы для расчета параметров и ошибок модели (1).
 ** Срок экспонирования, на который прогнозировали изменение цветových показателей по модели (1).

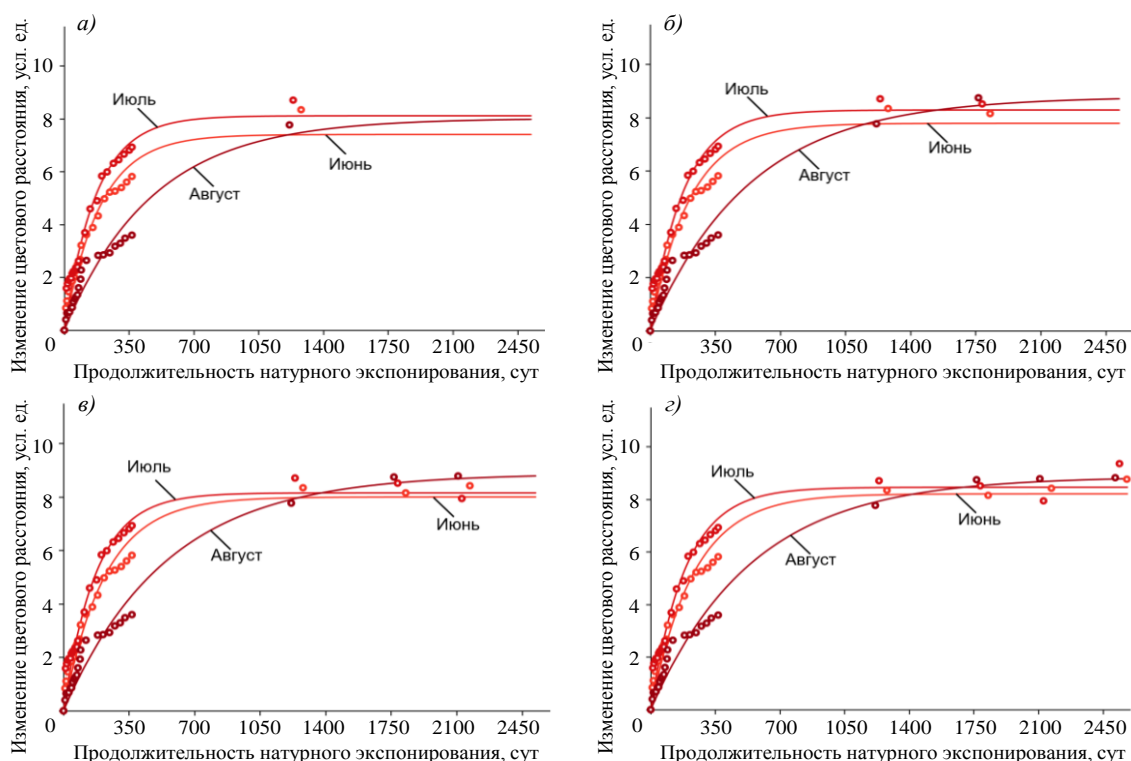


Рис. 2. Изменение цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эпоксидной эмали ЭП-140 при постановке на натурные испытания летом с учетом данных, полученных при экспонировании в течение 3,5 (а), 5 (б), 6 (в) и 7 лет (з): точки – экспериментальные данные, линии – модель (1)

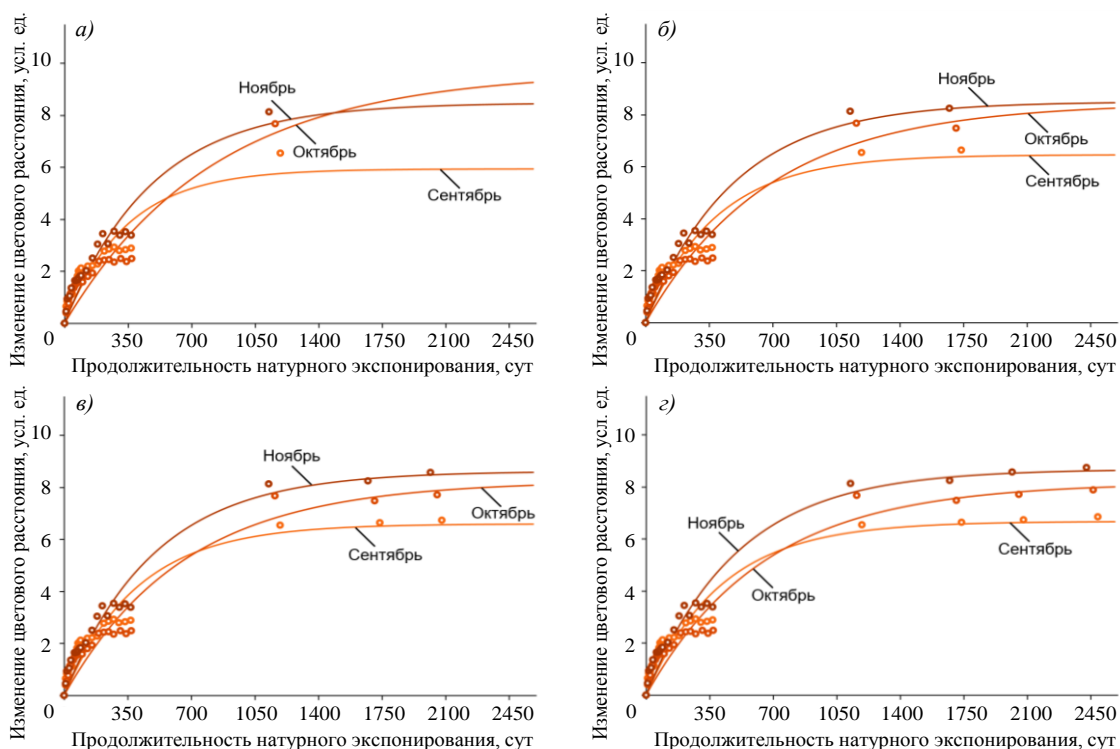


Рис. 3. Изменение цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эпоксидной эмали ЭП-140 при постановке на натурные испытания осенью с учетом данных, полученных при экспонировании в течение 3,5 (а), 5 (б), 6 (в) и 7 лет (г): точки – экспериментальные данные, линии – модель (1)

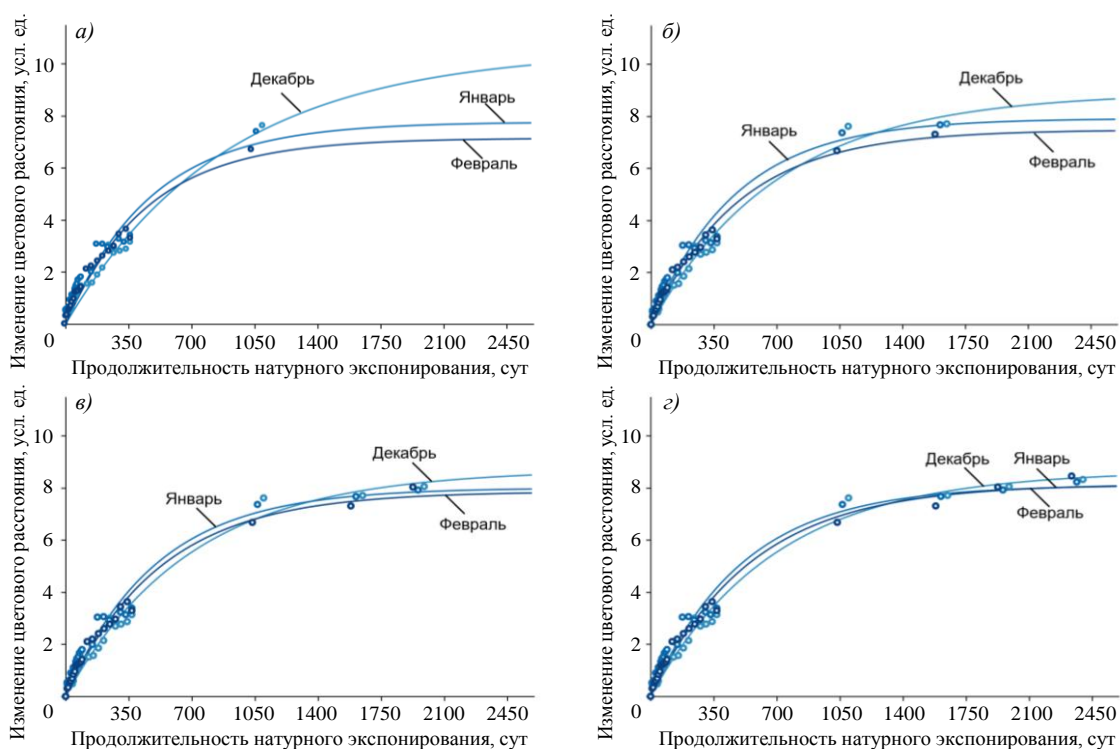


Рис. 4. Изменение цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эпоксидной эмали ЭП-140 при постановке на натурные испытания зимой с учетом данных, полученных при экспонировании в течение 3,5 (а), 5 (б), 6 (в) и 7 лет (г): точки – экспериментальные данные, линии – модель (1)

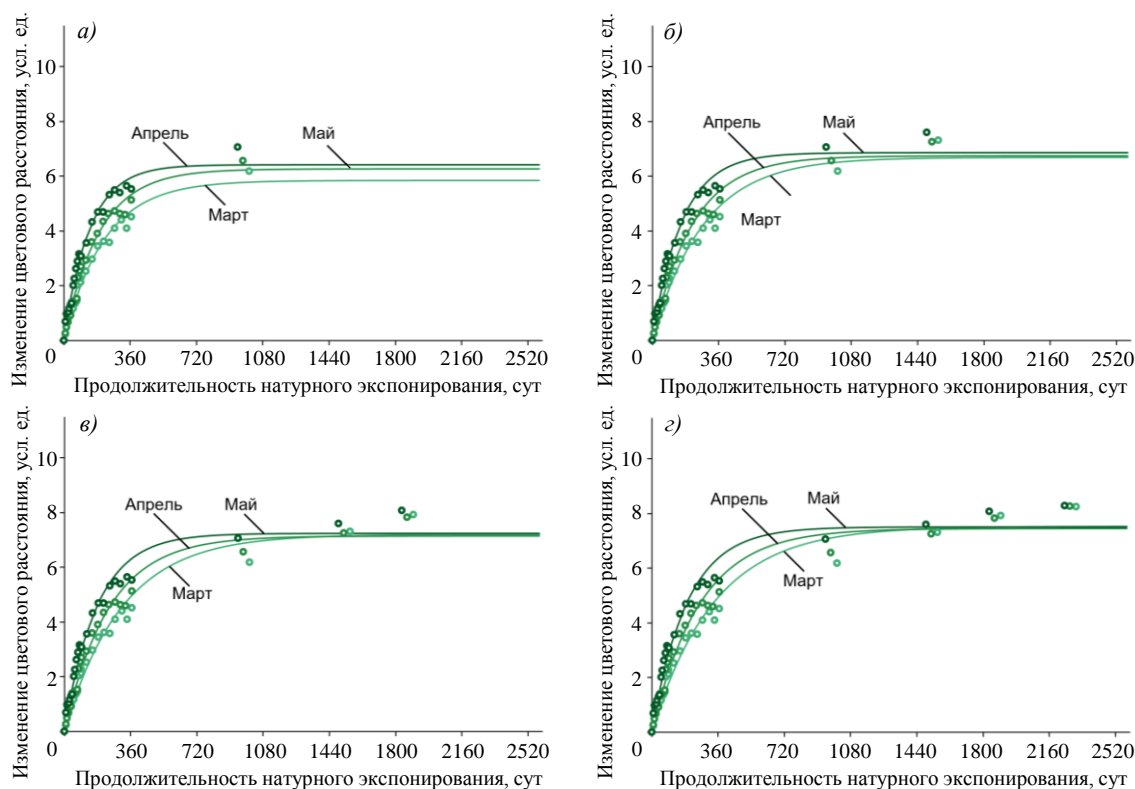


Рис. 5. Изменение цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эпоксидной эмали ЭП-140 при постановке на натурные испытания весной с учетом данных, полученных при экспонировании в течение 3,5 (а), 5 (б), 6 (в) и 7 лет (г): точки – экспериментальные данные, линии – модель (1)

Таблица 3

Параметры и ошибки модели (1) по данным, полученным при натурном экспонировании в течение 3,5; 5; 6 и 7 лет

Месяц начала экспонирования	Значения параметров и ошибок модели (1) при продолжительности натурального экспонирования, годы															
	3,5				5				6				7			
	ΔE_{\max} , усл. ед.	τ , сут	MSE	R^2	ΔE_{\max} , усл. ед.	τ , сут	MSE	R^2	ΔE_{\max} , усл. ед.	τ , сут	MSE	R^2	ΔE_{\max} , усл. ед.	τ , сут	MSE	R^2
Июнь	7,42	192	0,19	0,87	7,79	211	0,19	0,98	8,01	222	0,20	0,98	8,21	232	0,21	0,98
Июль	8,13	172	0,23	0,97	8,29	179	0,22	0,98	8,17	174	0,22	0,98	8,46	186	0,25	0,98
Август	8,03	474	0,44	0,95	8,79	539	0,20	0,97	8,88	549	0,19	0,98	8,90	551	0,18	0,98
Сентябрь	5,94	339	0,37	0,87	6,46	389	0,36	0,91	6,60	402	0,35	0,93	6,69	411	0,34	0,95
Октябрь	9,70	822	0,37	0,90	8,45	684	0,38	0,93	8,25	660	0,37	0,94	8,17	651	0,35	0,96
Ноябрь	8,48	481	0,31	0,93	8,51	484	0,29	0,96	8,62	493	0,29	0,97	8,69	500	0,28	0,97
Декабрь	10,55	889	0,09	0,97	8,92	715	0,10	0,98	8,71	691	0,10	0,98	8,66	685	0,10	0,99
Январь	7,77	475	0,22	0,94	7,92	469	0,21	0,96	8,01	497	0,20	0,97	8,12	508	0,19	0,98
Февраль	7,15	454	0,07	0,98	7,49	486	0,07	0,99	7,87	523	0,07	0,99	8,16	554	0,08	0,99
Март	5,85	221	0,05	0,98	6,68	277	0,09	0,98	7,20	314	0,13	0,98	7,53	339	0,15	0,98
Апрель	6,26	193	0,05	0,98	6,74	220	0,07	0,98	7,14	243	0,10	0,98	7,45	262	0,13	0,98
Май	6,41	140	0,07	0,98	6,85	160	0,10	0,98	7,24	178	0,14	0,98	7,51	192	0,17	0,98

Примечание. ΔE_{\max} – предельное значение цветового расстояния; τ – срок достижения $0,63E_{\max}$; MSE – среднеквадратичная ошибка; R^2 – коэффициент детерминации.

Параметр τ ожидаемо минимален, когда наблюдается высокий уровень УФ-составляющей солнечного излучения (186 сут – в июле) и максимален, когда уровень

УФ-излучения низкий (685 сут – в декабре). Расчеты показывают, что образцы, выставленные в июле, достигают значения $0,95\Delta E_{\max}$ за ~700 сут, а образцы, которые начали экспонировать в декабре – за ~1800 сут. Таким образом, после 5 лет экспонирования значение изменения цветового расстояния для всех образцов становится близким, но продолжительность его достижения различается.

Заключения

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

- экспоненциальная временная модель изменения цветового расстояния адекватно описывает экспериментальные данные для сроков экспонирования до 7 лет;
- изменение цветового расстояния систем ЛКП при экспонировании в течение 1 года существенно различается. Наибольшие изменения наблюдаются на образцах, экспонирование которых началось в месяцы с высоким уровнем УФ-излучения. Обнаруженный эффект сезонности следует учитывать при нанесении покрытий на технические системы, здания и сооружения при их эксплуатации в открытых климатических условиях, а также для обоснования сроков обслуживания;
- прямыми измерениями показано, что обнаруженный после 1 года экспонирования эффект сезонности существенно снижается после 3,5 лет и не наблюдается после 5 лет экспозиции: уровень изменения цветового расстояния становится сравнимым для образцов, выставленных на испытания в различные месяцы;
- параметры модели, полученные по экспериментальным данным за 5 лет натурального экспонирования, позволяют с высокой точностью прогнозировать изменение цветового расстояния на срок до 7 лет;
- программы климатических испытаний систем ЛКП должны включать контроль изменения цветовых показателей и иметь продолжительность не менее 5 лет.

Список источников

1. Кондрашов Э.К., Найденов Н.Д. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия авиационного назначения. Часть 1. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия на основе эпоксидных и полиуретановых пленкообразователей (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-81-90.
2. Кондрашов Э.К., Найденов Н.Д. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия авиационного назначения. Часть 2. Эластомерные эрозионностойкие радиопрозрачные лакокрасочные покрытия (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-94-101.
3. Кузнецова В.А., Емельянов В.В., Марченко С.А., Коврижкина Н.А. Влияние искусственного старения на свойства систем покрытий на основе бесхроматной грунтовки ВГ-44 с применением эпоксидных, полиуретановых, акрилуретановых и фторполиуретановых эмалей // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-119-131.
4. Кузнецова В.А., Железняк В.Г., Куршев В.А., Емельянов В.В. Исследование топливо- и водостойкости покрытий на основе наполненных эпоксидно-тиоколовых полимерных композиций // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 10. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-93-102.
5. Сердцелюбова А.С., Меркулова Ю.И., Загора А.Г., Куршев Е.В. Исследование параметров отверждения и защитной способности системы покрытия типа «база/лак» для окраски внешней поверхности авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 07. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 31.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-93-104.
6. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.

7. Старцев В.О., Валева Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
8. 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: 02.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-10-10.
9. Старцев В.О., Молоков М.В., Старцев О.В., Низина Т.А., Низин Д.Р. Влияние алифатического разбавителя ЭТАЛ-1 на климатическую стойкость эпоксидных полимеров на основе смолы ЭД-20 // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 12. С. 26–36.
10. Низина Т.А., Старцев В.О., Селяев В.П., Старцев О.В., Низин Д.Р. Анализ влияния актинометрических параметров на интенсивность изменения цветовых характеристик эпоксидных композитов в условиях морского климата // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 5. С. 95–101.
11. Старцев В.О., Хрулёв К.А., Евдокимов А.А. Влияние сезонности климатического воздействия на изменение цветовых характеристик эпоксидной эмали ЭП-140 // Коррозия: материалы, защита. 2017. № 6. С. 31–36.
12. 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.
13. Lebedev M.P., Startsev O.V. Regularities of aging of polymer and polymer composite materials in the conditions of the Far North // Russian Chemical Bulletin. 2023. Vol. 72. No. 2. P. 553–565.
14. Семенова Л.В., Нефедов Н.И., Белова М.В., Лаптев А.Б. Системы лакокрасочных покрытий для вертолетной техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
15. 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.
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: 02.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-103-110.
17. 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.
18. 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.
19. Molina M.T., Cano E., Ramírez-Barat B. Testing protective coatings for metal conservation: the influence of the application method // Heritage Science. 2023. Vol. 11. No. 1. Art. 94.
20. 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.
21. Startsev O.V., Perepechko I.I. Molecular mobility and relaxation in an epoxy matrix. 1. Influence of the reinforcing filler // Mechanics of Composite Materials. 1984. Vol. 20. No. 3. P. 271–274.
22. Старцев О.В., Болонин А.Б., Вапиров Ю.М., Кривов В.А., Владимирский В.Н., Офицерова М.Г. Улучшение вязкоупругих свойств акриловой эмали АС-1115 // Лакокрасочные материалы и их применение. 1986. № 4. С. 16–18.
23. Skrovanik D.J., Schöff C.K. Thermal mechanical analysis of organic coatings // Progress in Organic Coatings. 1988. Vol. 16. No. 2. P. 135–163.
24. Cristoforetti A., Rossi S., Deflorian F., Fedel M. On the Limits of the EIS Low-Frequency Impedance Modulus as a Tool to Describe the Protection Properties of Organic Coatings Exposed to Accelerated Aging Tests // Coatings. 2023. Vol. 13. No. 3. Art. 598.
25. Startsev O.V., Isupov V.V., Nikishin E.F. The Gradient of Mechanical Characteristics Across the Thickness of Composite Laminates After Exposure to a Low Earth Orbit Environment // Polymer Composites. 1998. Vol. 19. No. 1. P. 65–70.

26. Garibiyani B.A. Determination of the elastic modulus of the coating using a spherical indenter // Turkish Journal of Computer and Mathematics Education. 2021. Vol. 12. P. 1594–1600.
27. Chen J., Li B., Zeng X. et al. Study on the Influence of Accelerated Aging on the Properties of an RTV Anti-Pollution Flashover Coating // Polymers. 2023. Vol. 15. No. 3. Art. 751.
28. Руднев В.П. Влияние окружающей среды влажных субтропиков на цветовые характеристики защитных полимерных покрытий // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3. С. 56–64.
29. Pánek M., Reinprecht L. Critical view on the possibility of color changes prediction in the surfaces of painted wood exposed outdoors using accelerated weathering in Xenotest // Journal of Coatings Technology and Research. 2019. Vol. 16. No. 2. P. 339–352.
30. Zhumadilova Z., Selyaev V., Nurlybayev R. et al. Prediction of Durability of Thermal Insulating Epoxy Coatings with Regard to Climatic Ageing // Polymers. 2022. Vol. 14. No. 9. Art. 1650.
31. 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.
32. Malshe V.C., Waghoo G. Weathering study of epoxy paints // Progress in Organic Coatings. 2004. Vol. 51. No. 4. P. 267–272.
33. Al-Harbi F.A., Ayad N.M., Saber M.A. et al. Mechanical behavior and color change of facial prosthetic elastomers after outdoor weathering in a hot and humid climate // The Journal of Prosthetic Dentistry. 2015. Vol. 113. No. 2. P. 146–151.
34. Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р. Климатическая стойкость эпоксидных полимеров в умеренно континентальном климате. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2020. 188 с.
35. 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.
36. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 2. Новые подходы к оценке коррозионности приморских атмосфер // Коррозия: материалы, защита. 2016. № 1. С. 1–15.
37. Pickett J.E., Gardner M.M., Gibson D.A., Rice S.T. Global weathering of aromatic engineering thermoplastics // Polymer Degradation and Stability. 2005. Vol. 90. P. 405–417.
38. Pickett J.E., Gardner M.M. Reproducibility of Florida weathering data // Polymer Degradation and Stability. 2005. Vol. 90. No. 3. P. 418–430.
39. Fairchild M.D. Color Appearance Models // Color Appearance Models. Wiley, 2013. 480 p.
40. Ibraheem N., Hasan M., Khan R., Mishra P. Understanding Color Models : A Review // ARPN Journal of Science and Technology. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 265–275.
41. Schanda J. Colorimetry: Understanding the CIE System. Wiley, 2007. 398 p.

References

1. Kondrashov E.K., Naidenov N.D. Erosion resistant paint coverings of aviation purpose. Part 1. Erosion resistant paint coatings based on epoxy and polyurethane films forming (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-81-90.
2. Kondrashov E.K., Naidenov N.D. Erosion-resistant paint and varnish coatings for aviation purposes. Part 2. Elastomeric erosion resistant radio-transparent coatings (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-94-101.
3. Kuznetsova V.A., Yemelyanov V.V., Marchenko S.A., Kovrizhkina N.A. The influence of artificial aging on the properties of coating systems based on chromate-free primer VG-44 using epoxy, polyurethane, acrylic urethane and fluoropolyurethane enamels. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-119-131.
4. Kuznetsova V.A., Zheleznyak V.G., Kurshev E.V., Yemelyanov V.V. Research of fuel- and water resistance of coatings based on the filled epoxy-thiokol polymeric compositions. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-93-102.

5. Serdtselyubova A.S., Merkulova Yu.I., Zagora A.G., Kurshev E.V. Research of film-forming parameters and protective properties of basecoat/clearcoat system. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 31, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-93-104.
6. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
7. 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: November 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
8. 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: November 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-10-10.
9. Startsev V.O., Molokov M.V., Startsev O.V., Nizina T.A., Nizin D.R. Effect of aliphatic diluent ETAL-1 on climatic resistance of epoxy polymers based on ED-20 resin. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2016, no. 12, pp. 26–36.
10. Nizina T.A., Startsev V.O., Selyaev V.P., Startsev O.V., Nizin D.R. Analysis of the effect of actinometric parameters on the intensity of change in the color characteristics of epoxy composites in marine climate conditions. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2015, no. 5, pp. 95–101.
11. Startsev V.O., Khrulyov K.A., Evdokimov A.A. Influence of seasonality of climatic influence on the change in color characteristics of epoxy enamel EP-140. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2017, no. 6, pp. 31–36.
12. 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.
13. Lebedev M.P., Startsev O.V. Regularities of aging of polymer and polymer composite materials in the conditions of the Far North. *Russian Chemical Bulletin*, 2023, vol. 72, no. 2, pp. 553–565.
14. Semenova L.V., Nefedov N.I., Belova M.V., Laptev A.B. Systems of paint coatings for helicopter equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
15. Lebedev M.P., Startsev O.V., Koval T.V., Veligodsky 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.
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: November 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-103-110.
17. 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.
18. 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.
19. Molina M.T., Cano E., Ramírez-Barat B. Testing protective coatings for metal conservation: the influence of the application method. *Heritage Science*, 2023, vol. 11, no. 1, art. 94.
20. 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.
21. Startsev O.V., Perepechko I.I. Molecular mobility and relaxation in an epoxy matrix. 1. Influence of the reinforcing filler. *Mechanics of Composite Materials*, 1984, vol. 20, no. 3, pp. 271–274.
22. Startsev O.V., Bolonin A.B., Vapirov Yu.M., Krivov V.A., Vladimirsky V.N., Ofitserova M.G. Improving the viscoelastic properties of acrylic enamel AC-1115. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1986, no. 4, pp. 16–18.
23. Skrovanik D.J., Schöff C.K. Thermal mechanical analysis of organic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 1988, vol. 16, no. 2, pp. 135–163.
24. Cristoforetti A., Rossi S., Deflorian F., Fedel M. On the Limits of the EIS Low-Frequency Impedance Modulus as a Tool to Describe the Protection Properties of Organic Coatings Exposed to Accelerated Aging Tests. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 3, art. 598.

25. Startsev O.V., Isupov V.V., Nikishin E.F. The Gradient of Mechanical Characteristics Across the Thickness of Composite Laminates After Exposure to a Low Earth Orbit Environment. *Polymer Composites*, 1998, vol. 19, no. 1, pp. 65–70.
26. Garibiyani B.A. Determination of the elastic modulus of the coating using a spherical indenter. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 2021, vol. 12, pp. 1594–1600.
27. Chen J., Li B., Zeng X. et al. Study on the Influence of Accelerated Aging on the Properties of an RTV Anti-Pollution Flashover Coating. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 3, art. 751.
28. Rudnev V.P. Influence of the environment of humid subtropics on the color characteristics of protective polymer coatings. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2020, no. 3, pp. 56–64.
29. Pánek M., Reinprecht L. Critical view on the possibility of color changes prediction in the surfaces of painted wood exposed outdoors using accelerated weathering in Xenotest. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 339–352.
30. Zhumadilova Z., Selyaev V., Nurlybayev R. et al. Prediction of Durability of Thermal Insulating Epoxy Coatings with Regard to Climatic Ageing. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 9, art. 1650.
31. 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.
32. Malshe V.C., Waghoo G. Weathering study of epoxy paints. *Progress in Organic Coatings*, 2004, vol. 51, no. 4, pp. 267–272.
33. Al-Harbi F.A., Ayad N.M., Saber M.A. et al. Mechanical behavior and color change of facial prosthetic elastomers after outdoor weathering in a hot and humid climate. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2015, vol. 113, no. 2, pp. 146–151.
34. Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R. *Climatic resistance of epoxy polymers in a temperate continental climate*. Saransk: Publ. house of the Mordov. Univ., 2020, 188 p.
35. 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.
36. 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.
37. Pickett J.E., Gardner M.M., Gibson D.A., Rice S.T. Global weathering of aromatic engineering thermoplastics. *Polymer Degradation and Stability*, 2005, vol. 90, pp. 405–417.
38. Pickett J.E., Gardner M.M. Reproducibility of Florida weathering data. *Polymer Degradation and Stability*, 2005, vol. 90, no. 3, pp. 418–430.
39. Fairchild M.D. *Color Appearance Models*. Wiley, 2013, 480 p.
40. Ibraheem N., Hasan M., Khan R., Mishra P. Understanding Color Models: A Review. *ARPN Journal of Science and Technology*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 265–275.
41. Schanda J. *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Wiley, 2007, 398 p.

Информация об авторах

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

Коган Алексей Маркович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зеленева Татьяна Олеговна, техник, 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

Alexey M. Kogan, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatyana O. Zeleneva, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 02.12.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.12.2024.
The article was submitted 02.12.2024; approved and accepted for publication after reviewing 13.12.2024.