

Научная статья

УДК 667.6:535.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-152-162

## КЛИМАТИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ СИСТЕМ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ\* Часть 4. Аддитивность воздействия климатических факторов

В.О. Старцев<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.** Исследована аддитивность воздействия климатических факторов при климатическом старении систем лакокрасочных покрытий. Изучены цветовые показатели покрытий при лабораторных испытаниях для различных последовательностей воздействия песка и пыли, ультрафиолетового излучения, термоциклов. Показано, что при различных последовательностях воздействий изменение цветового расстояния систем различается. Проведено ранжирование последовательностей воздействий по величине изменения цветового расстояния.

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

**Для цитирования:** Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 4. Аддитивность воздействия климатических факторов // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 13. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-152-162.

Scientific article

## CLIMATIC AGING OF PAINT COATING SYSTEMS Part 4. Additivity of the impact of climate factors

V.O. Startsev<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.** In the fourth part of the series of articles on climatic aging of paint coating systems, the additivity of the impact of climatic factors is investigated. The color indices are studied in laboratory tests for different sequences of exposure to sand and dust, ultraviolet radiation, and thermal cycles. It is shown that the change in color distance differs for different sequences of exposure. The sequences of exposures are ranked by the magnitude of change in color distance.

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

**For citation:** Startsev V.O. Climatic aging of paint coating systems. Part 4. Additivity of the impact of climate factors. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), paper no. 13. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-152-162.

---

\* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 5 (147), 2025; часть 2 – см. «Труды ВИАМ», № 6 (148), 2025; часть 3 – см. «Труды ВИАМ», № 7 (149), 2025.

### Введение

В работе [1] исследовали системы лакокрасочных покрытий (ЛКП) на основе полиуретановой эмали в исходном состоянии и после ускоренных климатических испытаний. Показано, что применение эпоксидно-каучуковой грунтовки обеспечивает высокую устойчивость к эрозионному износу покрытия как в исходном состоянии, так и после воздействия различных факторов старения, а также высокий уровень защиты от коррозии алюминиевого сплава. Установлено, что воздействие повышенных температур положительно влияет на эрозионную стойкость систем ЛКП. Авторы исследования [2] провели поиск соответствия между результатами ускоренных (протоколы испытаний на атмосферные воздействия ZS (ZykStuttgart) и NP (New Protocol)) и натуральных климатических испытаний в двух климатических зонах (г. Штутгарт (Германия) и г. Хомстед (США)) систем полиуретановых покрытий. Изменения цветовых показателей нормировали по дозе солнечной радиации. Полученные результаты позволили уточнить режимы ускоренных испытаний. В работе [3] оценку изменения цветовых показателей систем акриловых покрытий также использовали при проведении натуральных и лабораторных климатических испытаний.

Длительное воздействие внешней среды вызывает ухудшение защитных свойств и цветовых показателей ЛКП [4]. Представлены примеры изменения блеска, цветовых характеристик и защитных свойств разных классов ЛКП после экспонирования в сухом жарком климате Аризоны [5], тропиках США [6, 7], Индии [8] и Вьетнама [9], в климате европейских стран [10] и России [11, 12], арктическом климате [13, 14] и даже в условиях открытого космического пространства [15, 16].

Атмосферостойкость ЛКП зависит от химического состава полимерной основы [5, 6, 8] и свойств цветовых пигментов [4, 11]. Пигменты добавляют как для защиты от коррозии, так и для улучшения эстетических свойств. Однако пигменты, добавленные в полимерную матрицу для эстетических целей, могут влиять не только на внешний вид материала, но и на устойчивость к коррозии. В работе [17] исследовано влияние серого, красного и оранжевого пигментов в трех различных концентрациях (стандартная, стандартная + 25 % (по массе), стандартная + 50 % (по массе)) как на внешний вид, так и на устойчивость к коррозии нанесенных покрытий. Для этой цели изучены полиэфирные порошковые покрытия, нанесенные на алюминиевую подложку. Исследовано влияние старения под действием ультрафиолетового (УФ) облучения и солевого тумана с контролем изменения показателей цвета и блеска покрытия. Доказано, что различные соотношения пигмента и матрицы заметно влияют на блеск и стабильность цвета в процессе старения (особенно в случае оранжевых и красных образцов), а также незначительно – на барьерные свойства покрытий.

Обычно для нахождения оптимальных составов ЛКП с повышенной стойкостью к агрессивным внешним воздействиям проводят ускоренные лабораторные испытания, выбирая режимы, характерные для условий эксплуатации, после чего сравнивают результаты с действием реальной натурной экспозиции.

Например, авторы работы [18] испытали три системы ЛКП в лабораторных и натуральных условиях. Образцы подвергали искусственному выветриванию в нейтральном солевом тумане в сочетании с УФ-облучением согласно ISO 9227:2017 [19], ISO 20340:2009-04 [20], ASTM G53-96 [21], ASTM D5894-21 [22]. Полученные результаты сопоставили с данными четырехлетних полевых испытаний в областях с коррозионной активностью, классифицированной как C3 и C5M (морское побережье Франции и США). Деградацию отдельных слоев системы покрытия (верхнего, базового и грунтовки) изучили с помощью инфракрасной спектроскопии, динамического механического анализа и электрохимической импедансной спектроскопии. В результате авторы продемонстрировали возможность выявления значимых факторов воздействия

по данным ускоренных и натуральных циклов испытаний. Показано, что пигменты, добавленные в полимерную матрицу, влияют не только на внешний вид, но и на защитные свойства покрытия. Однако количественные оценки синергетического воздействия агрессивных факторов не получены.

Фотохимические повреждения полимеров вызывает УФ-облучение [4]. В работе [23] исследованы эффекты воздействия УФ-излучения на физические, механические и термомеханические свойства ЛКП на основе эпоксидной смолы с дисперсным наполнителем. Полимерное покрытие содержало до 60 % (объемн.) гидратированного порошка оксида алюминия огнестойкого состава и таких наполнителей, как летучая зола. Наблюдения показали пожелтение поверхности чистого эпоксидного покрытия после воздействия УФ-излучения, но присутствие дисперсных наполнителей минимизировало выцветание и потерю массы. Микроскопия покрытия выявила образование микротрещин на поверхности чистой эпоксидной смолы и плотную микроструктуру в эпоксидной смоле с дисперсным наполнителем после воздействия УФ-излучения.

Примером эрозионных испытаний ЛКП является работа [24]. Покрытия на основе ароматического терморезистивного полиэфира продемонстрировали чрезвычайно низкие скорости износа. Механизм абразивного износа изучали при изменении продолжительности экспериментов от 57 до 228 ч. Действие частиц кварцевого песка разного размера оценивали методами сканирующей электронной микроскопии, микроцарапания и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

В работе [25] изучено действие термоциклов на синтетическое и эпоксидное покрытие. Свойства, связанные с адгезией покрытия к поверхности, исследовали до и после 100 циклов «замораживание–оттаивание». Использовали метод поперечного надреза и испытание на отрыв. Показано, что разрушение синтетического покрытия имело когезивный характер, тогда как для эпоксидного покрытия отмечен адгезионный разрыв.

Если ЛКП подвергаются одновременному или последовательному воздействию нескольких агрессивных факторов, то можно ожидать проявления синергизма, при котором совместное действие двух или более факторов приводит к результату, отличающемуся от простого суммирования (аддитивности) их индивидуальных эффектов. Аддитивность воздействия климатических факторов, т. е. эквивалентность их суммарного воздействия при различных последовательностях, до сих пор малоизучена. Поэтому в данной статье проведено сравнение изменения цветовых показателей ЛКП с фторполиуретановой и эпоксидной эмалями с добавлением пигментов красного и серого цвета при различных последовательностях воздействия песка и пыли, УФ-излучения и термоциклов.

### 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) покрытий с добавлением пигментов красного и серого цвета. Подробная информация об объектах испытаний приведена в предыдущих частях данной серии статей [26, 27].

Для исследования аддитивности использовали различные последовательности трех видов климатических факторов в лабораторных условиях: имитация солнечного (УФ) излучения (У), термоциклы (Т), воздействие песка и пыли (П).

Воздействие солнечного излучения проводили в климатической камере для имитации годового цикла в непрерывном режиме при температуре воздуха 45 °С (относительная влажность не нормировалась и составляла <10 %). Полный спектральный диапазон создаваемого излучения составлял 290–3000 нм, интегральная плотность потока излучения: 1400 Вт/м<sup>2</sup>. Плотность потока УФ-излучения в интервале длин волн от 290

до 400 нм составляла  $120 \text{ Вт/м}^2$ . При проведении испытаний образцы в камере располагали горизонтально, параллельно источнику излучения, чтобы обеспечить перпендикулярность потока излучения к их 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. Температуру воздуха контролировали с помощью термометра сопротивления, защищенного от попадания прямого солнечного излучения экраном и находящегося в области камеры с максимально интенсивным воздухообменом. Продолжительность воздействия составляла 400 ч.

Для проведения термоциклирования использовали двухкамерную систему с автоматическим перемещением оснастки с образцами между камерами. Испытания проводили в интервале температур от  $-5$  до  $+30$  °С, продолжительность экспозиции при каждой температуре составляла 2 ч. Проводили 30 термоциклов, продолжительность испытаний составляла 120 ч.

Для проведения лабораторных испытаний, имитирующих воздействие пыли, использовали камеру статической и динамической пыли. Воздействие пыли проводили при скорости обдува образцов  $15 \text{ м/с}$ , температуре пылевоздушной смеси  $30$  °С, концентрации пыли в пылевоздушной смеси  $5 \text{ г/м}^3$ . Состав пылевой смеси, % (по массе): 70 – кварцевый песок, 15 – мел, 15 – каолин. Размер частиц не превышал  $200 \text{ мкм}$  (перед началом испытаний компоненты пылевой смеси просеивали через сито с соответствующим размером ячейки). Концентрацию пыли контролировали в рабочем объеме камеры каждые 2 ч путем фильтрации запыленного воздуха с последующим определением изменения массы фильтра. Образцы в камере располагали вертикально, перпендикулярно потоку пылевоздушной смеси. Образцы размещали на сетчатой полке, обеспечивающей свободное прохождение потока запыленного воздуха через рабочий объем испытательной камеры. Продолжительность испытаний составляла 56 ч.

Реализованы шесть различных последовательностей воздействий: ПТУ, ПУТ, ТПУ, ТУП, УПТ, УТП.

С помощью спектрофотометра со сферической геометрией измерения определяли значения различия цвета, светлоты, цветового тона систем ЛКП на экспонируемых образцах и рассчитывали значение полного цветового различия (цветового расстояния)  $\Delta E$  в системе CIE  $L^*a^*b^*$ . При проведении испытаний на воздействие песка и пыли цветовые показатели измеряли каждые 4 ч после промывания поверхности образцов (14 значений), при проведении термоциклов – каждые 8 ч (15 значений), при воздействии УФ-излучения – после 400 ч (1 значение).

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

### Результаты и обсуждение

Изменение цветового расстояния системы ЛКП на основе эпоксидной эмали ЭП-140 с добавлением пигмента красного цвета при различных последовательностях воздействия показано на рис. 1. Видно, что цветовое расстояние, достигаемое при разных последовательностях, находится в диапазоне  $17,75\text{--}20,65$  усл. ед. Для этой системы ЛКП наибольший вклад в изменение цветового расстояния вносит воздействие песка и пыли, следующий по значимости фактор – воздействие УФ-излучения, наименее значимым является термоциклирование. Влияние каждого фактора на изменение цветового расстояния существенно различается в разных последовательностях.

Воздействие песка и пыли максимально, если оно первое в последовательности (ПТУ, ПУТ ( $18,31$  усл. ед.)), а минимально – если последнее (ТУП ( $15,50$  усл. ед.), УТП ( $14,75$  усл. ед.)). Воздействие излучения также максимально в последовательностях, где оно было первым (УПТ, УТП ( $3,61$  усл. ед.)), и минимально, если было последним

(ПТУ (0,10 усл. ед.), ТПУ (0,46 усл. ед.)). Воздействие термоциклов, наоборот, минимально в последовательностях, где оно было первым (ТПУ, ТУП (0,72 усл. ед.)), а максимально в последовательностях, где оно было последним (ПУТ (1,80 усл. ед.), УПТ (1,61 усл. ед.)).

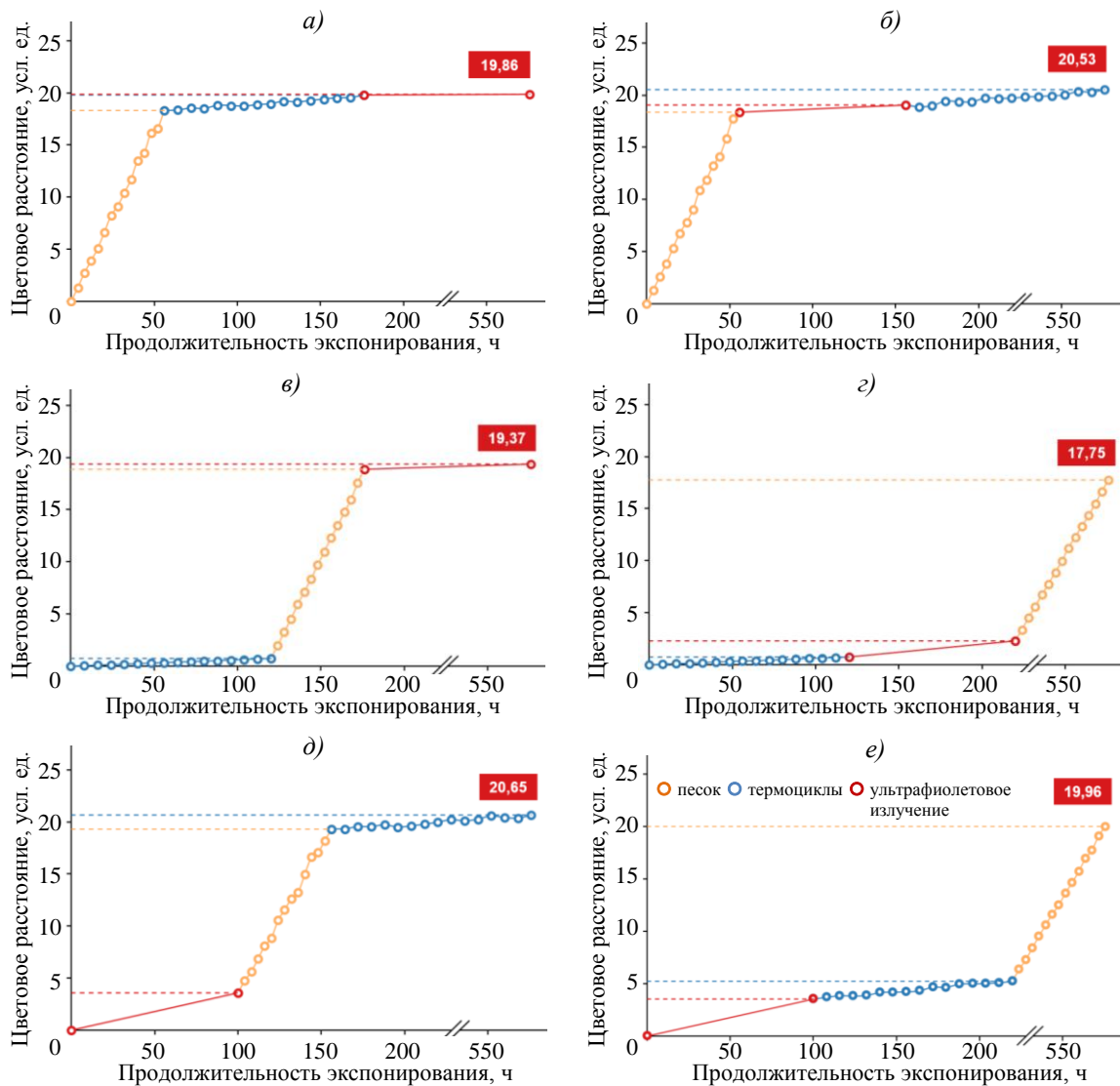


Рис. 1. Изменение цветового расстояния образцов с системой лакокрасочного покрытия на основе эпоксидной эмали ЭП-140 с добавлением пигмента красного цвета при последовательности воздействия ПТУ (а), ПУТ (б), ТПУ (в), ТУП (з), УПТ (д), УПТ (е). П – песок и пыль, У – солнечное (ультрафиолетовое) излучение, Т – термоциклы

Аналогичные данные получены для системы ЛКП на основе эпоксидной эмали ЭП-140 с добавлением пигмента серого цвета, а также на основе фторполиуретановой эмали ВЭ-69 с добавлением пигментов красного и серого цвета.

На рис. 2 приведены сравнительные гистограммы влияния последовательности воздействия различных факторов на изменение цветового расстояния для всех исследованных образцов. Данные рис. 2 подтверждают полученные ранее сведения о большей стойкости фторполиуретановой эмали по сравнению с эпоксидной и о том, что в системах с добавлением красного пигмента изменения цвета значительно больше, чем в системах с добавлением серого пигмента.

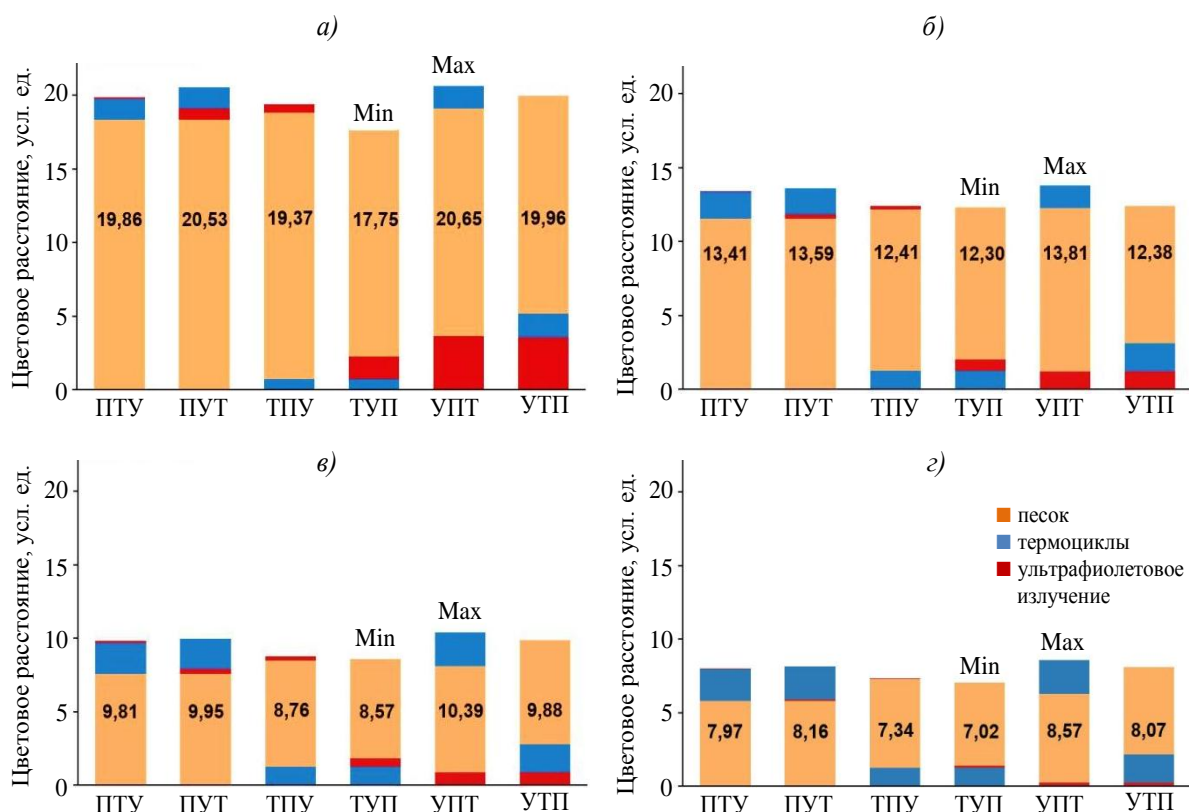


Рис. 2. Влияние последовательности воздействия различных факторов на изменение цветового расстояния для эпоксидной эмали ЭП-140 (а, б) и фторполиуретановой эмали ВЭ-69 (в, г) с пигментами красного (а, в) и серого (б, г) цвета. П – песок и пыль, У – солнечное (ультрафиолетовое) излучение, Т – термоциклы

Первый важный вывод, который можно сделать при анализе рис. 2, заключается в том, что экспериментально подтверждена неэквивалентность суммарного воздействия климатических факторов при различных последовательностях, т. е. принцип аддитивности не выполняется. Если обнаруженную неэквивалентность нормировать по максимальному изменению цветового расстояния, то для систем на основе эмали ЭП-140 с красным и серым пигментами различия составляют 14 и 11 % соответственно, а для систем на основе эмали ВЭ-69 увеличиваются до 18 %.

Второй существенный вывод – для всех четырех систем ЛКП последовательность УПТ вызывает максимальное изменение цвета, а последовательность ТУП – минимальное.

В таблице приведены изменения цветового расстояния (в том числе в процентах) всех исследованных систем ЛКП после каждого воздействия для всех последовательностей. Анализ данных из таблицы позволяет детально изучить различие последовательностей воздействия, а также влияние каждого фактора внутри последовательности.

Воздействие песка и пыли вызывает наибольшее изменение цветового расстояния. Для систем на основе эмали ВЭ-69 с красным и серым пигментами вклад этого фактора составляет от 69,5 до 82,6 % соответственно. Для системы покрытия на основе эмали ЭП-140 влияние значительнее – до 87,8 и 93,3 % при наличии серого и красного пигментов соответственно. Влияние песка и пыли значительнее, когда это воздействие первое или второе в последовательности.

Изменение цветового расстояния исследованных систем лакокрасочных покрытий (ЛКП) после различных воздействий при разных последовательностях

Система ЛКП	Цветовое расстояние, усл. ед./%, после воздействия																							
	песка и пыли (П)									солнечного (ультрафиолетового) излучения (У)									термоциклов (Т)					
	ПТУ	ПУТ	ТПУ	ТУП	УПТ	УТП	ПТУ	ПУТ	ТПУ	ТУП	УПТ	УТП	ПТУ	ПУТ	ТПУ	ТУП	УПТ	УТП						
ЭП-140 (красная)	$\frac{18,35}{92,4}$	$\frac{18,35}{89,3}$	$\frac{18,08}{93,3}$	$\frac{15,52}{87,4}$	$\frac{15,72}{76,1}$	$\frac{14,69}{73,6}$	$\frac{1,41}{7,1}$	$\frac{1,50}{7,3}$	$\frac{0,72}{3,7}$	$\frac{0,72}{4,1}$	$\frac{1,34}{6,5}$	$\frac{1,68}{8,4}$	$\frac{0,10}{0,5}$	$\frac{0,69}{3,3}$	$\frac{0,57}{2,9}$	$\frac{1,51}{8,5}$	$\frac{3,59}{17,4}$	$\frac{3,59}{18,0}$						
ЭП-140 (серая)	$\frac{11,52}{85,9}$	$\frac{11,52}{84,8}$	$\frac{10,89}{87,8}$	$\frac{10,29}{83,7}$	$\frac{11,08}{80,2}$	$\frac{9,29}{75,0}$	$\frac{1,84}{13,7}$	$\frac{1,75}{12,9}$	$\frac{1,25}{10,1}$	$\frac{1,25}{10,2}$	$\frac{1,55}{11,2}$	$\frac{1,91}{15,4}$	$\frac{0,05}{0,4}$	$\frac{0,32}{2,4}$	$\frac{0,27}{2,2}$	$\frac{0,76}{6,2}$	$\frac{1,18}{8,5}$	$\frac{1,18}{9,5}$						
ВЭ-69 (красная)	$\frac{7,56}{77,1}$	$\frac{7,56}{76,0}$	$\frac{7,24}{82,6}$	$\frac{6,76}{78,9}$	$\frac{7,22}{69,5}$	$\frac{7,12}{72,1}$	$\frac{2,13}{21,7}$	$\frac{2,07}{20,8}$	$\frac{1,25}{14,3}$	$\frac{1,25}{14,6}$	$\frac{2,32}{22,3}$	$\frac{1,91}{19,3}$	$\frac{0,12}{1,2}$	$\frac{0,32}{3,2}$	$\frac{0,27}{3,1}$	$\frac{0,56}{6,5}$	$\frac{0,85}{8,2}$	$\frac{0,85}{8,6}$						
ВЭ-69 (серая)	$\frac{5,81}{72,9}$	$\frac{5,81}{71,2}$	$\frac{6,06}{82,6}$	$\frac{5,67}{80,8}$	$\frac{6,02}{70,2}$	$\frac{5,93}{73,5}$	$\frac{2,13}{26,7}$	$\frac{2,27}{27,8}$	$\frac{1,19}{16,2}$	$\frac{1,19}{17,0}$	$\frac{2,32}{27,1}$	$\frac{1,91}{23,7}$	$\frac{0,03}{0,4}$	$\frac{0,08}{1,0}$	$\frac{0,09}{1,2}$	$\frac{0,16}{2,3}$	$\frac{0,23}{2,7}$	$\frac{0,23}{2,9}$						

Существенно различается вклад термоциклирования в изменение цветовых показателей для различных систем покрытий. Для системы на основе эмали ЭП-140 с красным пигментом вклад термоциклирования в общее изменение цветового расстояния составляет 4,1–8,4 %, с серым пигментом – увеличивается до 10,1–15,4 %, для систем на основе эмали ВЭ-69 с пигментом красного и серого цвета – существенно увеличивается (до 14,3–22,3 и 16,2–27,8 % соответственно). Обнаружено также, что влияние термоциклирования всегда минимально в тех последовательностях, где оно является первым.

Наибольшую вариативность демонстрирует воздействие УФ-излучения, вклад которого кратно изменяется в зависимости от последовательности воздействия. Например, для системы на основе эмали ЭП-140 с пигментом красного цвета для последовательностей с первоначальным воздействием песка и пыли вклад УФ-излучения минимальный (0,5–3,3 %), для последовательностей, начинающихся с воздействия термоциклов, возрастает до 2,9–8,5 %, а для последовательностей, где первоначальным было воздействие излучения, увеличивается до 17,4–18,0 %. Аналогичное существенное повышение показателя наблюдается и для остальных исследованных систем покрытий.

### Заключения

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

Принцип аддитивности при различных последовательностях воздействий климатических факторов не соблюдается, различия в изменении цветового расстояния составляют до 14 и 18 % для систем покрытий на основе эпоксидной эмали ЭП-140 и фторполиуретановой эмали ВЭ-69 соответственно.

Для всех исследованных систем покрытий последовательность воздействий УПТ вызывает максимальное изменение цветового расстояния, а последовательность ТУП – минимальное.

Количественно охарактеризован вклад каждого климатического фактора при различных последовательностях воздействий.

Полученные результаты требуют развития исследований, направленных на изучение неэквивалентности воздействия различных последовательностей климатических факторов.

### Список источников

1. Железняк В.Г., Сердцелюбова А.С., Меркулова Ю.И., Сквивко П.В. Система лакокрасочных покрытий на основе полиуретановой эмали для защиты лобовых обогреваемых поверхностей изделий авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 10. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
2. Oehler H., Wanner M., Aktas L. et al. Site-specific weathering of coatings: II. Comparison of natural weathering and accelerated protocols for Central Europe and Florida // *Journal of Coatings Technology and Research*. 2025. Vol. 22. No. 2. P. 739–761.
3. Ładosz Ł., Sudół E., Kozikowska E., Choińska E. Artificial Weathering Test Methods of Waterborne Acrylic Coatings for Steel Structure Corrosion Protection // *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 8. Art. 1857.
4. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
5. 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.
6. Johnson B.W., McIntyre R. Analysis of test methods for UV durability predictions of polymer coatings // *Progress in Organic Coatings*. 1996. Vol. 27. No. 1–4. P. 95–106.

7. Меркулова Ю.И., Куршев Е.В., Вдовин А.И., Андреева Н.П. Микроструктурные и электрохимические исследования лакокрасочных покрытий в условиях натуральных климатических испытаний тропического климата Северной Америки // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 11. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
8. Malshe V.C., Waghoo G. Weathering study of epoxy paints // *Progress in Organic Coatings*. 2004. Vol. 51. No. 4. P. 267–272.
9. 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: 15.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-103-110.
10. Ломакин А.Д. Натурные климатические испытания защитных покрытий на древесине // *Жилищное строительство*. 2013. № 9. С. 41–46.
11. Лебедев М.П., Старцев О.В., Коваль Т.В., Велигодский И.М. Мультиплетные релаксационные  $\alpha$ -переходы во фторуретановом покрытии после климатического старения // *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2024. Т. 516. № 1. С. 45–51.
12. Ерофеев В.Т., Смирнов И.В., Воронов П.В. и др. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 11. С. 911–924.
13. 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.
14. 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.
15. Старцев О.В., Никишин Е.Ф. Старение полимерных композитных материалов в условиях открытого космоса // *Механика композитных материалов*. 1993. № 4. С. 457–467.
16. 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.
17. Rossi S., Fedel M., Deflorian F., Zanol S. Influence of different colour pigments on the properties of powder deposited organic coatings // *Materials & Design*. 2013. Vol. 50. P. 332–341.
18. Perrin F.X., Merlatti C., Aragon E., Margaiïlan A. Degradation study of polymer coating: Improvement in coating weatherability testing and coating failure prediction // *Progress in Organic Coatings*. 2009. Vol. 64. No. 4. P. 466–473.
19. ISO 9227:2017. Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests. Geneva, 2017. 26 p.
20. ISO 20340:2009-04. Paints and varnishes – Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures. Geneva, 2009. 23 p.
21. ASTM G53-96. Practice for operating light- and water-exposure apparatus (fluorescent UV-condensation type) for exposure of nonmetallic materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000. 9 p.
22. ASTM D5894-21. Standard practice for cyclic salt fog/UV exposure of painted metal (alternating exposures in a fog/dry cabinet and a UV/condensation cabinet) // *Annual Book of ASTM Standards*. 2001. Vol. 06.01. DOI: 10.1520/D5894-21.
23. Khotbehsara M.M., Manalo A., Aravinthan T. et al. Effects of ultraviolet solar radiation on the properties of particulate-filled epoxy based polymer coating // *Polymer Degradation and Stability*. 2020. Vol. 181. Art. 109352.
24. Lan P., Polychronopoulou K., Zhang Y., Polycarpou A.A. Three-body abrasive wear by (silica) sand of advanced polymeric coatings for tilting pad bearings // *Wear*. 2017. Vol. 382–383. P. 40–50.
25. Procházká L., Brázdová A. Impact of Freeze-thaw Cycles on Coatings Applied to the Surface of Alkali-activated Materials // *9th World Multidisciplinary Congress on Civil Engineering, Architecture, and Urban Planning (WMCCAUI 2024)*. Ostrava, 2024. P. 1–7.

26. 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: 15.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-86-97.
27. 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> (дата обращения: 15.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-105-118.

### References

1. Zheleznyak V.G., Serdcelyubova A.S., Merkulova Yu.I., Skivko P.V. Paint coating system based on polyurethane enamel for protecting heated frontal surfaces of aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
2. Oehler H., Wanner M., Aktas L. et al. Site-specific weathering of coatings: II. Comparison of natural weathering and accelerated protocols for Central Europe and Florida. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2025, vol. 22, no. 2, pp. 739–761.
3. Ładosz Ł., Sudoł E., Kozikowska E., Chojińska E. Artificial Weathering Test Methods of Waterborne Acrylic Coatings for Steel Structure Corrosion Protection. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 8, art. 1857.
4. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
5. 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.
6. Johnson B.W., McIntyre R. Analysis of test methods for UV durability predictions of polymer coatings. *Progress in Organic Coatings*, 1996, vol. 27, no. 1–4, pp. 95–106.
7. Merkulova Yu.I., Kurshev E.V., Vdovin A.I., Andreeva N.P. Microstructural and electrochemical studies of paint coatings under natural climate tests of tropical climate of North America. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
8. Malshe V.C., Waghoo G. Weathering study of epoxy paints. *Progress in Organic Coatings*, 2004, vol. 51, no. 4, pp. 267–272.
9. 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: June 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-103-110.
10. Lomakin A.D. Natural climatic tests of protective coatings on wood. *Zhilishchnoe stroitelstvo*, 2013, no. 9, pp. 41–46.
11. Lebedev M.P., Startsev O.V., Koval T.V., Veligodsky I.M. Multiplet relaxation  $\alpha$ -transitions in a fluororethane coating after climatic aging. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Khimiya, nauki o materialakh*, 2024, vol. 516, no. 1, pp. 45–51.
12. Erofeev V.T., Smirnov I.V., Voronov P.V. et al. Study of the durability of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2016, no. 11, p. 911–924.
13. 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.
14. 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.
15. Startsev O.V., Nikishin E.F. Aging of polymer composite materials in outer space. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1993, no. 4, pp. 457–467.

16. 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.
17. Rossi S., Fedel M., Deflorian F., Zanol S. Influence of different colour pigments on the properties of powder deposited organic coatings. *Materials & Design*, 2013, vol. 50, pp. 332–341.
18. Perrin F.X., Merlatti C., Aragon E., Margaillan A. Degradation study of polymer coating: Improvement in coating weatherability testing and coating failure prediction. *Progress in Organic Coatings*, 2009, vol. 64, no. 4, pp. 466–473.
19. ISO 9227:2017. *Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests*. Geneva, 2017, 26 p.
20. ISO 20340:2009-04. *Paints and varnishes – Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures*. Geneva, 2009, 23 p.
21. ASTM G53-96. *Practice for operating light- and water-exposure apparatus (fluorescent UV-condensation type) for exposure of nonmetallic materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000, 9 p.
22. ASTM D5894-21. Standard practice for cyclic salt fog/UV exposure of painted metal, (alternating exposures in a fog/dry cabinet and a UV/condensation cabinet). *Annual Book of ASTM Standards*, 2001, vol. 06.01. DOI: 10.1520/D5894-21.
23. Khotbehsara M.M., Manalo A., Aravinthan T. et al. Effects of ultraviolet solar radiation on the properties of particulate-filled epoxy based polymer coating. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, vol. 181, art. 109352.
24. Lan P., Polychronopoulou K., Zhang Y., Polycarpou A.A. Three-body abrasive wear by (silica) sand of advanced polymeric coatings for tilting pad bearings. *Wear*, 2017, vol. 382–383, pp. 40–50.
25. Procházka L., Brázdová A. Impact of Freeze-thaw Cycles on Coatings Applied to the Surface of Alkali-activated Materials. *9th World Multidisciplinary Congress on Civil Engineering, Architecture, and Urban Planning (WMCCAUI 2024)*. Ostrava, 2024, pp. 1–7.
26. 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 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-86-97.
27. 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> (accessed: July 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-105-118.

### Информация об авторах

**Старцев Валерий Олегович**, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

### Information about the authors

**Valery O. Startsev**, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), 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 07.07.2025.  
The article was submitted 30.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 07.07.2025.