

Научная статья

УДК 620.193:67.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-195-207

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ И ДИФФУЗИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКЛОПЛАСТИКА ВПС-53/Т-25 ПРИ НАТУРНЫХ И УСКОРЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

В.О. Старцев¹, А.А. Нечаев¹

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

Аннотация. Проведены климатические испытания стеклопластика ВПС-53/Т-25 в открытых условиях умеренного и умеренно теплого климата в течение 12 мес., а также лабораторные имитационные испытания по двум режимам. После всех промежуточных съемов измеряли пределы прочности при изгибе с учетом обратимого воздействия влаги. Осуществляли изменение массы образцов при сушке и увлажнении для определения параметров влагопереноса. Рассчитаны корреляционные зависимости исследованных характеристик при проведении натуральных и ускоренных климатических испытаний.

Ключевые слова: климатическое старение, стеклопластик, предел прочности при изгибе, коэффициент диффузии, математическое моделирование, корреляционная зависимость

Для цитирования: Старцев В.О., Нечаев А.А. Анализ корреляции изменений механических и диффузионных характеристик стеклопластика ВПС-53/Т-25 при натуральных и ускоренных климатических испытаниях // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 195–207. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-195-207.

Scientific article

ANALYSIS OF THE CORRELATION OF CHANGES IN MECHANICAL AND DIFFUSION CHARACTERISTICS OF FIBERGLASS VPS-53/T-25 DURING FULL-SCALE AND ACCELERATED CLIMATIC TESTS

V.O. Startsev¹, A.A. Nechaev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Climatic testing of VPS-53/T-25 fiberglass was conducted in outdoor, moderate and moderately warm climates for 12 months, as well as laboratory simulation tests in two modes. After all intermediate measurements, flexural strengths were measured, taking into account the reversible effect of moisture. The mass of the specimens was measured during drying and wetting to determine moisture transfer parameters. Correlations between the studied characteristics were calculated during full-scale and accelerated climatic tests.

Keywords: climatic aging, fiberglass, bending strength, diffusion coefficient, mathematical modeling, correlation dependence

For citation: Startsev V.O., Nechaev A.A. Analysis of the correlation of changes in mechanical and diffusion characteristics of fiberglass VPS-53/T-25 during full-scale and accelerated climatic tests. *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 195–207. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-195-207.

Введение

Прогнозирование длительной работоспособности полимерных композиционных материалов (ПКМ) в условиях реальной эксплуатации – одна из важнейших задач современного материаловедения [1–4]. Традиционный подход к оценке долговечности базируется на длительных натурных испытаниях, которые могут занимать годы и даже десятилетия, что существенно замедляет внедрение в производство новых материалов и конструкций. В связи с этим все большее распространение получают методы ускоренных лабораторных испытаний, позволяющие в сжатые сроки смоделировать воздействие различных климатических факторов [5–9]. Однако ключевой проблемой остается отсутствие надежных корреляционных зависимостей между результатами ускоренных и натурных испытаний [10–13]. Понимание этих корреляций критически важно для разработки адекватных моделей прогнозирования изменения показателей ПКМ в реальных условиях эксплуатации [14–16], в том числе с учетом использования защитных покрытий [17–19]. В работе [5] выполнено прямое сопоставление натурального и лабораторного ускоренного старения древесно-полимерных композитов. В обоих типах испытаний наблюдалось снижение предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве с одновременным ростом модуля упругости; твердость образцов после естественного старения снизилась на 8–12,5 % в зависимости от состава и места экспозиции. В исследовании [6] изучено влияние ускоренного старения (56 дней) на льняные композиты и установлено, что определяющее влияние на остаточные свойства оказывает тип армирующего волокна, тогда как выбор полимерной матрицы имеет меньшее значение. Для ПКМ на основе базальтового волокна комбинированное ультрафиолетовое (УФ) облучение и воздействие повышенной влажности в течение 504 ч привели к снижению предела прочности при растяжении на 12 %, а прочности при изгибе – на 7 % [7]. При этом введение наноразмерных модификаторов позволило уменьшить степень деградации. В работе [8] исследование термопластичных композитов показало, что для угле- и стеклопластиков доминирующим механизмом под действием УФ-облучения оказалась сшивка, что привело к повышению прочности (до 147 % для стеклопластика и 142 % для углепластика), тогда как для арамидных композитов после 2160 ч облучения зафиксировано снижение прочности до 94 % от исходного уровня. Продолжительность экспозиции была пересчитана в эквивалентную годовую дозу УФ-излучения для климата Мельбурна. В работе [9] установлено, что фотоокисление локализовано в поверхностном слое льняных композитов и сопровождается изменением кристалличности; при этом композиты на вторичном полипропилене проявили более высокую устойчивость к фотоокислению по сравнению с первичным. Прямое сопоставление ускоренных (до 1200 ч) и натурных (до 3 лет) испытаний ПКМ в термовлажностных условиях [12] показало, что снижение прочности после 1000 ч ускоренного старения составляет 37,57 %, а после 3 лет натурной экспозиции 35,60 %. На основе пяти моделей машинного обучения построена корреляционная зависимость, позволяющая прогнозировать продолжительность натурального старения по ускоренным данным. В исследовании [13] установлено, что 13,48 дней ускоренного старения при температуре 85°C и относительной влажности 85 % эквивалентны одному году реальной выдержки в климате Гуанчжоу; прогнозируемый срок хранения исследуемого ПКМ до снижения межслойной прочности на 23 % составляет 14,47 лет. Материалы, экспонировавшиеся в открытом море, в стандартных лабораторных (УФ + морская вода при комнатной температуре) и в ускоренных условиях (УФ + морская вода при 60 °C) [10], продемонстрировали сходные тенденции деградации в натурных и стандартных лабораторных условиях. При ускоренном старении деградация была более выраженной, но механизмы

разрушения оставались неизменными. Для пултрузионных стеклопластиков, испытанных при постоянных температурах ($-15 \div +60$ °C) в течение 12 мес. и после 100–200 термоциклов [11], выявлено незначительное снижение механических свойств, за исключением прочности при растяжении, зависящей от свойств матрицы: для винилэфирной матрицы минимальное сохранение свойства составило 74 %, для ненасыщенной полиэфирной – достигло 83 % при температуре -15 °C. В работе [20] исследована долговечность ПКМ на основе эпоксидной смолы, армированных стеклянными, базальтовыми и углеродными волокнами, в условиях натурального старения в течение двух лет в Лиссабоне. Эпоксидно-углеродные композиты сохранили ~90 % исходных свойств, в то время как для стеклопластиков снижение механических показателей достигает 35 %. При сравнении одного года натурального старения и 20 лет ускоренного старения для кремнеземных стеклопластиков [21] установлено, что после 20 лет ускоренного старения диэлектрическая проницаемость возросла на 30,63 % по сравнению с 4,34 % после одного года натуральных испытаний, что указывает на необходимость корректировки коэффициентов ускорения. В работе [22] показано, что разрушение поверхностного слоя экспонированных образцов снижает точность измерения их толщины и значительно увеличивает разброс значений измеряемых параметров. Данное наблюдение критически важно для корректного сравнения результатов натуральных и ускоренных испытаний, поскольку изменение геометрических размеров образца напрямую влияет на расчетные прочностные характеристики. В монографии [23] обобщены современные подходы к прогнозированию долговечности композитов на основе природных волокон с учетом результатов ускоренных и натуральных испытаний. В обзорной работе [14] систематизированы данные о механизмах термического и тепловлажностного старения ПКМ на основе растительных волокон, особое внимание уделено проблеме корреляции ускоренных лабораторных испытаний с реальными условиями эксплуатации, обсуждаются методы прогнозирования остаточного ресурса с использованием моделей Аррениуса и принципа суперпозиции. В работе [24] представлены результаты длительных (до 110 мес.) испытаний гибридных угле- и стеклопластиков, применяемых для усиления железобетонных конструкций, в условиях сопоставления ускоренного лабораторного и натурального старения. Установлено, что снижение механических свойств после длительной натурной экспозиции составляет 35–40 %, а эквивалентное ускоренное старение в лабораторных условиях (циклическое воздействие температуры и влажности) позволило воспроизвести аналогичные механизмы разрушения и получить сопоставимые количественные показатели, что подтверждает корректность ускоренных методов.

В большинстве работ делается вывод о том, что стандартизованные методы ускоренного старения не всегда адекватно воспроизводят сложные синергетические эффекты реального климата. Наиболее перспективным направлением представляется разработка комбинированных протоколов испытаний, учитывающих не только отдельные климатические факторы, но и их совместное воздействие. Особого внимания заслуживают работы, в которых предпринимается прямая калибровка ускоренных режимов по результатам натурной экспозиции [8, 13, 21, 25]. Формирование надежных корреляционных моделей – необходимое условие для перехода от эмпирических коэффициентов запаса к обоснованному прогнозированию срока службы ПКМ в реальных условиях эксплуатации. В данной работе поставлена задача поиска корреляционных зависимостей между изменениями механических показателей и показателей влагопереноса стеклопластика ВПС-53/Т-25 при натуральных и ускоренных климатических испытаниях.

Материалы и методы

Исследовали стеклопластик ВПС-53/Т-25 на основе стеклянной ткани Т-25 и связующего ВСЭ-34 [26, 27]. Плиты стеклопластика экспонировали в открытых условиях умеренного климата (Москва) и умеренно теплого климата (Геленджик) в течение 12 мес., основные климатические показатели приведены в работах [27–29]. Ускоренные лабораторные климатические испытания проводили по двум режимам (имитация годового цикла), включающим в себя последовательное воздействие повышенной и пониженной температур, перепадов температур и солнечного излучения. При втором режиме ускоренных испытаний воздействие солнечного излучения совмещено с воздействием повышенной влажности воздуха, а интегральная плотность потока солнечного излучения увеличена с 1120 до 1400 Вт/м².

При проведении натурных испытаний после 3, 6, 9 и 12 мес. экспонирования пластины снимали с испытаний и выполняли измерение предела прочности при изгибе (σ_b) по ГОСТ 25.602–80. Использовали исходные и экспонированные образцы без дополнительного кондиционирования (без сушки) и образцы, высушенные при температуре 60 °С в течение 14 сут, для исключения обратимого воздействия влаги. Аналогичные измерения проводили для пластин после ускоренных лабораторных испытаний – после имитации 0,5; 1; 1,5; 2 и 3 лет натурных испытаний. Изменение предела прочности при изгибе σ_b от продолжительности экспонирования аппроксимировали полиномом первой степени:

$$\sigma_b = \sigma_{b0} + k_{\sigma}t, \quad (1)$$

где σ_{b0} – значение предела прочности при изгибе в исходном состоянии, МПа; k_{σ} – коэффициент, характеризующий скорость изменения предела прочности при изгибе при экспонировании, МПа/мес.; t – продолжительность экспонирования, мес.

Для исключения влияния сезонного содержания влаги использовали значения предела прочности при изгибе после проведения сушки.

Подготовленные из пластин образцы размером 50×50×2 мм использовали для исследования влагопереноса [30–34] по двум последовательным режимам: увлажнение при температуре 60 °С и относительной влажности 98±2 % до равновесного состояния и сушка при температуре 60 °С в эксикаторе с прокаленным силикагелем до равновесного состояния. При этом выполняли измерения массы образцов на аналитических весах с погрешностью 10^{–4} г. Полученные экспериментальные данные аппроксимировали с использованием второго закона Фика с постоянными параметрами [35–37]. Изменение коэффициента диффузии влаги D (на стадии увлажнения) от продолжительности экспонирования аппроксимировали полиномом первой степени:

$$D = D_0 + k_D t, \quad (2)$$

где D_0 – значение коэффициента диффузии в исходном состоянии, мм²/сут; k_D – коэффициент, характеризующий скорость изменения коэффициента диффузии при экспонировании, (мм²/сут)/мес.; t – продолжительность экспонирования, мес.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены диаграммы изменения предела прочности стеклопластика ВПС-53/Т-25 при проведении климатических испытаний в натурных условиях умеренного и умеренно теплого климата.

Снижение предела прочности при изгибе за 12 мес. натурального экспонирования в условиях умеренного климата составило 4,7 %, а в агрессивных условиях умеренно теплого климата 15,2 %.

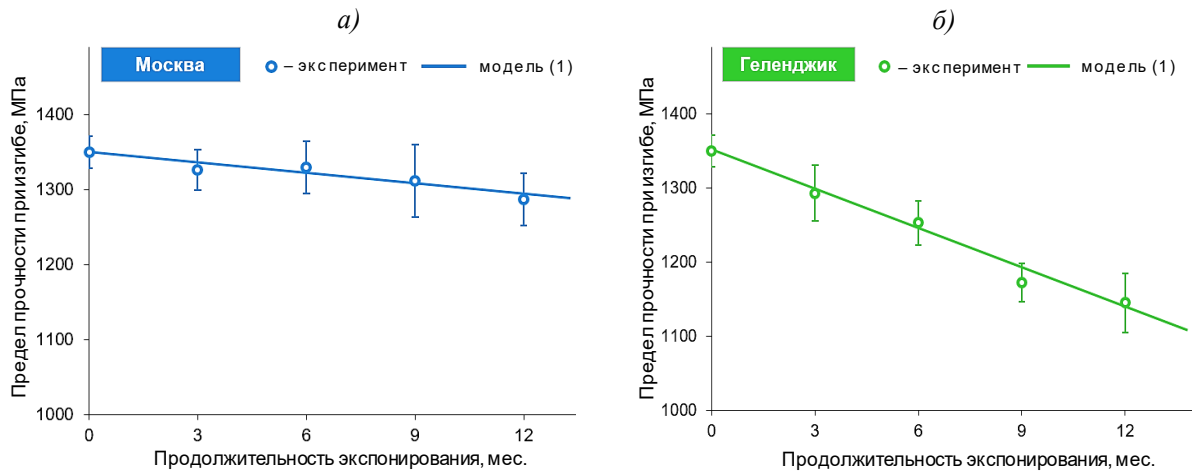


Рис. 1. Изменение предела прочности при изгибе стеклопластика ВПС-53/Т-25 при натурном экспонировании в условиях умеренного (а) и умеренно теплого климата (б)

На рис. 2 показано изменение предела прочности при изгибе при имитационных лабораторных климатических испытаниях. Продолжительность имитации одного года натурных испытаний по режиму 1 составляет 2,8 мес., а по режиму 2: 1,8 мес. При моделировании и построении диаграмм использовали реальную продолжительность ускоренных лабораторных испытаний.

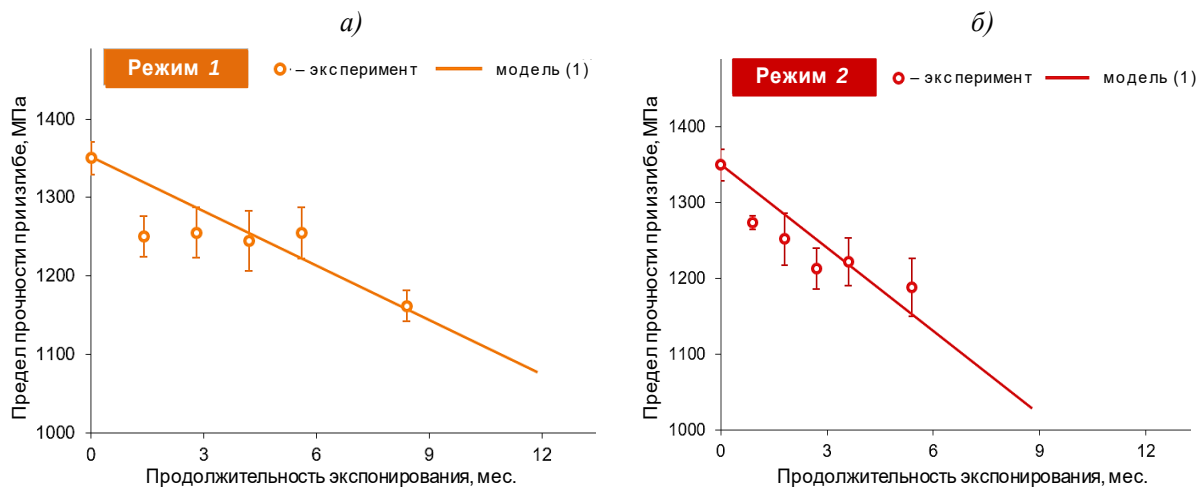


Рис. 2. Изменение предела прочности при изгибе стеклопластика ВПС-53/Т-25 при ускоренных лабораторных испытаниях по режимам 1 (а) и 2 (б)

Видно, что при проведении ускоренных лабораторных испытаний в течение 6 мес. снижение значений предела прочности при изгибе по режиму 1 составляет 7 %, при режиме 2 снижение достигает 12 %.

Экспериментальные данные изменения предела прочности при изгибе аппроксимировали моделью (1), результаты моделирования приведены в табл. 1.

Модели для экспериментальных данных при натурном экспонировании показывают высокое качество аппроксимации – коэффициенты детерминации (R) близки к 1, ошибка прогноза составляет 7–11 МПа. При лабораторных ускоренных испытаниях качество аппроксимации несколько ниже ($R^2 = 0,91\text{--}0,93$; $\text{RMSE} = 33\text{--}37$ МПа).

Таблица 1

Коэффициенты модели (1)

Вид климатических испытаний	k_σ , МПа/мес.*	RMSE, МПа**	R^2
Натурные в умеренном климате	–4,8	7,2	0,97
Натурные в умеренно теплом климате	–17,8	11,2	0,99
Ускоренные лабораторные по режиму 1	–22,9	36,8	0,91
Ускоренные лабораторные по режиму 2	–36,5	33,6	0,93
* Для всех видов испытаний $\sigma_{b0} = 1350$ МПа.			
** RMSE – среднеквадратичная ошибка прогноза модели.			

Полученные значения коэффициента k_σ позволяют ранжировать проведенные климатические испытания по скорости снижения предела прочности при изгибе. Минимальная скорость наблюдается при натурных климатических испытаниях в условиях умеренного климата (около –5 МПа/мес.), максимальная – при ускоренных лабораторных испытаниях по режиму 2 (около –36 МПа/мес.).

Проведена оценка корреляционной зависимости между сроками экспонирования ($t_{\text{уск}}$) в лабораторных ускоренных климатических испытаниях (аргумент) и сроками экспонирования ($t_{\text{нат}}$) при натурных климатических испытаниях (отклик). Для этого для каждого времени экспонирования в натурных условиях определяли соответствующие сроки экспонирования в ускоренных условиях, при котором достигается одинаковое значение предела прочности при изгибе (по модели (1)), рассчитывали коэффициент Пирсона (r) и строили уравнение регрессии вида:

$$t_{\text{нат}} = kt_{\text{уск}}, \quad (3)$$

где k – коэффициент ускорения.

Результаты расчетов по экспериментальным данным и по модели (1) приведены в табл. 2.

Как видно, коэффициент Пирсона близок к 1 для умеренного климата (практически идеальная линейная связь полученных пар) и составляет 0,92–0,94 для умеренно теплого климата. Для умеренного климата экспериментальные коэффициенты корреляции существенно превышают теоретические, что вызвано разбросом данных и немонотонностью изменения предела прочности при изгибе при ускоренных испытаниях, при этом точность прогноза составляет ~1,5 мес. и при относительной ошибке 25 %.

Таблица 2

Значения коэффициента ускорения k модели (3)
по измерениям предела прочности при изгибе

Натурные испытания	Ускоренные испытания	Тип оценки*	Коэффициент ускорения k	Коэффициент Пирсона r	RMSE, мес.	Относительная ошибка, %
Умеренный климат	Режим 1	Э	14,5	0,998	1,49	24,8
		Т	4,80	—	—	—
	Режим 2	Э	17,1	0,999	1,48	24,7
		Т	7,65	—	—	—
Умеренно теплый климат	Режим 1	Э	1,29	0,924	2,46	41,0
		Т	1,28	—	—	—
	Режим 2	Э	1,81	0,941	2,26	37,7
		Т	2,05	—	—	—
* Э – экспериментальная оценка, полученная путем интерполяции экспериментальных данных значений предела прочности и регрессии через начало координат; Т – теоретическая оценка, рассчитанная как отношение коэффициентов модели (1).						

Для умеренно теплого климата, наоборот, коэффициенты Пирсона для экспериментальных данных близки к теоретическим (1,29 и 1,28; 1,81 и 2,05 для режимов 1 и 2 соответственно), но ошибка прогноза увеличивается до 2,3–2,5 мес. при относительной ошибке 38–41 %. Таким образом, из-за разброса экспериментальных данных значений предела прочности при изгибе для практического прогнозирования предпочтительно использовать не модельные, а эмпирические зависимости с оценкой их точности.

Аналогичные расчеты сделаны для поиска корреляционных зависимостей, но в качестве характеристики материала использовали коэффициент диффузии влаги на стадии увлажнения. Диаграммы изменения этого показателя при экспонировании в натуральных условиях в умеренном и умеренно теплом климате показаны на рис. 3, а при проведении лабораторных ускоренных испытаний – на рис. 4.

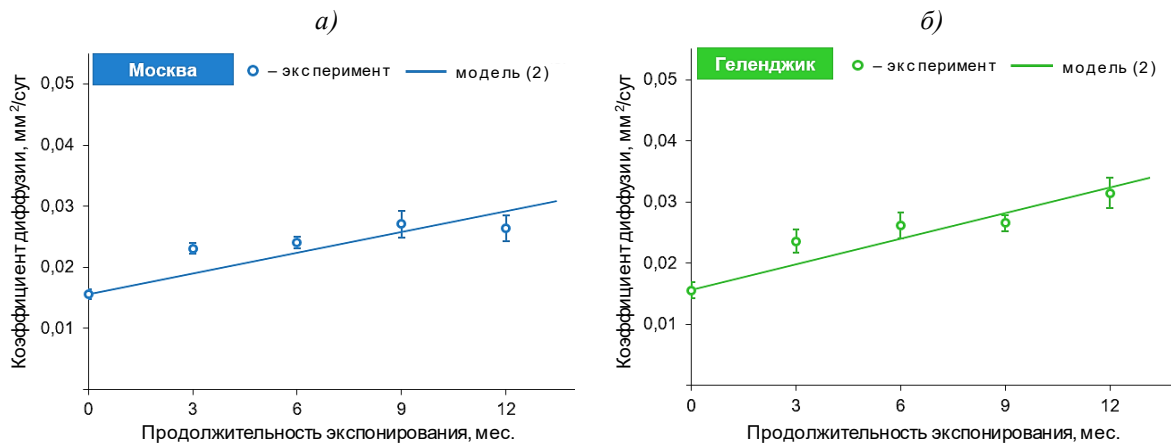


Рис. 3. Изменение коэффициента диффузии влаги на стадии увлажнения стеклопластика ВПС-53/Т-25 при натурном экспонировании в условиях умеренного (а) и умеренно теплого климата (б)

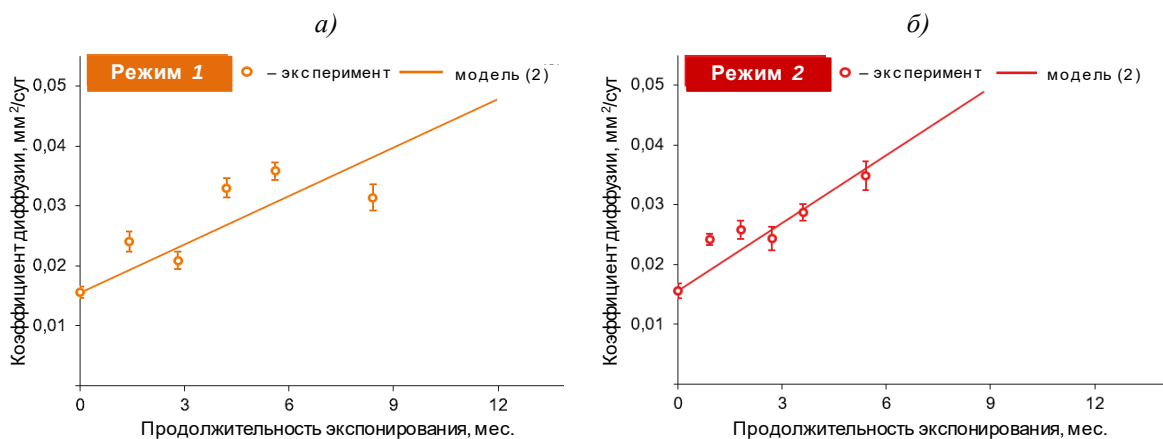


Рис. 4. Изменение коэффициента диффузии влаги на стадии увлажнения стеклопластика ВПС-53/Т-25 при ускоренных лабораторных испытаниях по режимам 1 (а) и 2 (б)

Результаты аппроксимации изменения коэффициента диффузии на стадии увлажнения приведены в табл. 3.

Скорость роста коэффициента диффузии в умеренно теплом климате на 25–30 % выше, чем в умеренном климате (0,0011 и 0,0014 ($\text{мм}^2/\text{сут}$)/мес. соответственно). При ускоренных лабораторных испытаниях этот показатель существенно увеличивается: до 0,0027 ($\text{мм}^2/\text{сут}$)/мес. при режиме 1 и до 0,0037 ($\text{мм}^2/\text{сут}$)/мес. при режиме 2.

Таблица 3

Коэффициенты модели (2)

Вид климатических испытаний	k_D , (мм ² /сут)/мес.*	RMSE, мм ² /сут**	R^2
Натурные в умеренном климате	0,0011	0,0027	0,92
Натурные в умеренно теплом климате	0,0014	0,0024	0,95
Ускоренные лабораторные по режиму 1	0,0027	0,0052	0,87
Ускоренные лабораторные по режиму 2	0,0037	0,0029	0,94
* Для всех видов испытаний $D_0 = 0,0156$ мм ² /сут.			
** RMSE – среднеквадратичная ошибка прогноза модели.			

Проведена оценка корреляционной зависимости между сроками экспонирования ($t_{\text{уск}}$) в лабораторных ускоренных климатических испытаниях (аргумент) и сроками экспонирования ($t_{\text{нат}}$) при натурных климатических испытаниях (отклик). Для этого для каждого времени экспонирования в натурных условиях определяли соответствующие сроки экспонирования в ускоренных условиях, при котором достигается одинаковое значение коэффициента диффузии (по модели (2)), рассчитывали коэффициент Пирсона (r) и строили уравнение регрессии вида (3), результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициента ускорения k модели (3) по значениям коэффициента диффузии

Значения коэффициента ускорения k модели (2) по значениям коэффициента диффузии						
Натурные испытания	Ускоренные испытания	Тип оценки*	Коэффициент ускорения k	Коэффициент Пирсона r	RMSE, мес.	Относительная ошибка, %
Умеренный климат	Режим 1	Э	3,07	0,950	1,50	25,0
		Т	2,36	—	—	—
	Режим 2	Э	3,41	0,928	1,97	32,8
		Т	3,31	—	—	—
Умеренно теплый климат	Режим 1	Э	2,50	0,942	1,61	26,8
		Т	1,91	—	—	—
	Режим 2	Э	2,58	0,969	1,18	19,7
		Т	2,68	—	—	—
* Э – экспериментальная оценка, полученная путем интерполяции экспериментальных данных значений коэффициента диффузии влаги и регрессии через начало координат; Т – теоретическая оценка, рассчитанная как отношение коэффициентов модели (2).						

Видно, что для коэффициента диффузии влаги корреляционные зависимости между натурными и ускоренными испытаниями демонстрируют высокое совпадение связи (значения r составляют 0,928–0,969), а коэффициенты ускорения, полученные по экспериментальным данным, близки к теоретическим. Некоторое различие наблюдается только для зависимости «умеренный климат–ускоренный режим 1» (3,07 и 2,36 соответственно).

Заключения

На начальной стадии старения предел прочности при изгибе адекватно описывается линейной моделью ($R^2 > 0,9$), максимальная скорость снижения этого показателя (–36,5 МПа/мес.) достигается при режиме 2 ускоренных испытаний, а минимальная – в умеренном климате (–4,8 МПа/мес.). Коэффициент диффузии влаги при экспонировании также линейно возрастает, причем скорость роста максимальна

при режиме 2 ускоренных испытаний, а в умеренном климате минимальна (табл. 4). Для умеренно теплого климата экспериментальные коэффициенты k по изменениям предела прочности при изгибе близки к теоретическим, а для умеренного климата экспериментальные значения k существенно выше теоретических. Расчет по коэффициентам диффузии дает более стабильные корреляции. При решении прогнозных задач также следует учитывать, что корреляционные зависимости между результатами ускоренных испытаний и умеренно теплого климата наиболее надежны, поскольку при этом значения k близки к теоретическим, а среднеквадратичная ошибка прогноза модели минимальна. Полученные линейные корреляционные зависимости пригодны для прогнозирования свойств стеклопластика, но требуют учета разброса данных для повышения точности.

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

Список источников

1. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Арктическое материаловедение. Томск: Изд. дом Томск. гос. ун-та, 2018. Вып. 3. 44 с.
2. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: 2. Relaxation of the initial structural nonequilibrium and through thickness gradient of properties // Russian Metallurgy (Metally). 2011. No. 10. P. 1001–1007.
3. 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.
4. Старцев О.В., Никишин Е.Ф. Старение полимерных композитных материалов в условиях открытого космоса // Механика композитных материалов. 1993. № 4. С. 457–467.
5. Siddiqui M.N., Redhwi H.H., Andrady A.L. et al. Effect of Extensive Solar Ultra-Violet Irradiation on the Durability of High-Density Polyethylene- and Polypropylene-Based Wood-Plastic Composites // Polymers. 2024. Vol. 17. No. 1. P. 74.
6. Das S.C., La Rosa A.D., Goutianos S., Grammatikos S. Effect of accelerated weathering on the performance of natural fibre reinforced recyclable polymer composites and comparison with conventional composites // Composites Part C: Open Access. 2023. Vol. 12. Art. 100378.
7. Hashim U.R., Jumahat A., Jawaid M., Dungani R., Alamery S. Effects of Accelerated Weathering on Degradation Behavior of Basalt Fiber Reinforced Polymer Nanocomposites // Polymers. 2020. Vol. 12. No. 11. Art. 2621.
8. Rogha E., Bazli M., Shakiba M. et al. UV-induced transformations and mechanical performance of 3D-printed thermoplastic CFRP, GFRP, and AFRP composites // Composites Communications. 2025. Vol. 59. Art. 102591.
9. Alam L., Piezel B., Sicot O. et al. UV accelerated aging of unidirectional flax composites: Comparative study between recycled and virgin polypropylene matrix // Polymer Degradation and Stability. 2023. Vol. 208. Art. 110268.
10. Xi X., Zhang S., Hao Z. et al. Durability assessment of vacuum-infused GFRP laminates and I-beams in marine environments // Case Studies in Construction Materials. 2025. Vol. 22. Art. e04743.
11. Hassanshahi O., Jorge M., Sena-Cruz J. et al. Durability of GFRP Composites Produced by Pultrusion under Thermal Environments // Procedia Structural Integrity. 2024. Vol. 64. P. 81–88.
12. Wang J., Karimi S., Zeinalzad P. et al. Using machine learning and experimental study to correlate and predict accelerated aging with natural aging of GFRP composites in hygrothermal conditions // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 444. Art. 137576.
13. Fan J., Zhang Q., Chen X., He Y. Interlaminar Shear Strength Change and Storage Life Prediction of Carbon Fiber/Epoxy Composites with Hygrothermal Accelerated Aging // Polymers. 2024. Vol. 16. No. 8. Art. 1109.

14. Fourari A., Chakkour M., Ould Moussa M., Khay I., Ben Zineb T. A Comprehensive Review on Thermal and Hygro/Hydrothermal Aging of Plant Fiber Composites: Properties, Degradation Mechanisms, and Service Life Prediction // *Polymer Composites*. 2025. Vol. 46. No. 16. P. 14576–14620.
15. Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Сидорина А.И., Соловьева Н.А. Усталость конструкционных органопластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). С. 89–100. URL: <https://journal.viam.ru> (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-89-100.
16. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). С. 70–80. URL: <https://journal.viam.ru> (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
17. Ерофеев В.Т., Смирнов И.В., Воронов П.В., Афонин В.В., Каблов Е.Н., Старцев О.В., Старцев В.О., Медведев И.М. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 11. С. 911–924.
18. Старцев В.О., Низина Т.А. Прогнозирование климатического старения эпоксидных полимеров по изменению цветовых показателей // *Труды ВИАМ*. 2015. № 12. С. 80–85. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-10-10.
19. Старцев В.О., Фролов А.С. Влияние климатического воздействия на цветовые характеристики лакокрасочных покрытий // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2015. № 3. С. 16–18.
20. Shahid A.T., Garrido M., Correia J.R. Durability under natural outdoor weathering of sustainable composites developed with bio-based unsaturated polyester and epoxy resins reinforced with glass, basalt, and carbon fibres // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 505. P. 144651.
21. Haider I., Khan M.A., Aziz S. et al. Exploring the Weathering and Accelerated Environmental Aging of Wave-Transparent Reinforced Composites // *Polymers*. 2025. Vol. 17. No. 3. P. 357.
22. Startsev O.V., Veligodsky I.M., Medvedev I.M., Gladkikh A.V., Gorbovets M.A. Measurement of Strength and Fracture Load of Weathered Samples of Polymer Composite Materials // *Polymer Science. Series D*. 2024. Vol. 17. No. 2. P. 302–310.
23. Aging Effects on Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites / eds. C. Muthukumar, S. Krishnasamy, S.M.K. Thiagamani, S. Siengchin. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. 350 p.
24. Hao Z.-H., Zeng J.-J., Chen G.-M. et al. Durability of FRP-to-concrete bonded joints subjected to 110 months accelerated laboratory and field exposure // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 305. P. 117681.
25. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K. The effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics // *Heliyon*. 2020. Vol. 6. No. 3. P. e03481.
26. Коваль Т.В., Велигодский И.М., Громова А.А. Исследование пластифицирующего влияния влаги на свойства ПКМ на основе эпоксидного связующего ВСЭ-34 после 5 лет экспозиции в различных климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2021. № 9 (103). С. 105–116. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-105-116.
27. Старцев В.О., Молоков М.В., Постнов В.И., Старостина И.В. Оценка влияния климатического воздействия на свойства стеклопластика ВПС-53К // *Известия Самарского научного центра Российской Академии наук*. 2017. Т. 19. № 4 (2). С. 220–228.
28. 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.
29. Корниенко Г.В., Старцев О.В., Кротов А.С., Коваль Т.В. Моделирование зависимости модуля сдвига углепластика от времени увлажнения и влагосодержания // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 3 (80). С. 161–178. URL: <https://journal.viam.ru> (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-161-178.

30. Старцев В.О., Панин С.В., Старцев О.В. Сорбция и диффузия влаги в полимерных композитных материалах с ударными повреждениями // *Механика композитных материалов*. 2015. Т. 51. № 6. С. 1081–1094.
31. Filistovich D.V., Startsev O.V., Kuznetsov A.A. et al. Effect of moisture on the anisotropy of the dynamic shear modulus of glass-reinforced plastics // *Doklady Physics*. 2003. Vol. 48. No. 6. P. 306–308.
32. Старцев О.В., Кротов А.С., Сенаторова О.Г. и др. Сорбция и диффузия влаги в слоистых металлополимерных композиционных материалах типа «СИАЛ» // *Материаловедение*. 2011. № 12. С. 38–44.
33. Kablov E.N., Startsev O.V., Panin S.V. Moisture transfer in carbon-fiber-reinforced plastic with degraded surface // *Doklady Physical Chemistry*. 2015. Vol. 461. No. 2. P. 80–83.
34. Startsev O.V., Makhonkov A.Y., Erofeev V., Gudojnikov S. Impact of moisture content on dynamic mechanical properties and transition temperatures of wood // *Wood Material Science and Engineering*. 2017. Vol. 12. No. 1. P. 55–62.
35. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 p.
36. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
37. Crank J. The mathematics of diffusion. Second ed. Oxford: Clarendon press, 1975. 414 p.

References

1. Buznik V.M., Kablov E.N. *Arctic materials science*. Tomsk: Publ. house. house Tomsk. State Univ., 2018, is. 3, 44 p.
2. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: 2. Relaxation of the initial structural nonequilibrium and through thickness gradient of properties. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2011, no. 10, pp. 1001–1007.
3. 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.
4. Startsev O.V., Nikishin E.F. Aging of polymer composite materials in outer space. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1993, no. 4, pp. 457–467.
5. Siddiqui M.N., Redhwi H.H., Andrady A.L. et al. Effect of Extensive Solar Ultra-Violet Irradiation on the Durability of High-Density Polyethylene- and Polypropylene-Based Wood–Plastic Composites. *Polymers*, 2024, vol. 17, no. 1, pp. 74.
6. Das S.C., La Rosa A.D., Goutianos S., Grammatikos S. Effect of accelerated weathering on the performance of natural fibre reinforced recyclable polymer composites and comparison with conventional composites. *Composites Part C: Open Access*, 2023, vol. 12, art. 100378.
7. Hashim U.R., Jumahat A., Jawaid M., Dungan R., Alamery S. Effects of Accelerated Weathering on Degradation Behavior of Basalt Fiber Reinforced Polymer Nanocomposites. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 11, art. 2621.
8. Rogha E., Bazli M., Shakiba M. et al. UV-induced transformations and mechanical performance of 3D-printed thermoplastic CFRP, GFRP, and AFRP composites. *Composites Communications*, 2025, vol. 59, art. 102591.
9. Alam L., Piezel B., Sicot O. et al. UV accelerated aging of unidirectional flax composites: Comparative study between recycled and virgin polypropylene matrix. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, vol. 208, art. 110268.
10. Xi X., Zhang S., Hao Z. et al. Durability assessment of vacuum-infused GFRP laminates and I-beams in marine environments. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, vol. 22, art. e04743.
11. Hassanshahi O., Jorge M., Sena-Cruz J. et al. Durability of GFRP Composites Produced by Pultrusion under Thermal Environments. *Procedia Structural Integrity*, 2024, vol. 64, pp. 81–88.
12. Wang J., Karimi S., Zeinalzad P. et al. Using machine learning and experimental study to correlate and predict accelerated aging with natural aging of GFRP composites in hygrothermal conditions. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 444, art. 137576.

13. Fan J., Zhang Q., Chen X., He Y. Interlaminar Shear Strength Change and Storage Life Prediction of Carbon Fiber/Epoxy Composites with Hygrothermal Accelerated Aging. *Polymers*, 2024, vol. 16, no. 8, art. 1109.
14. Fourari A., Chakkour M., Ould Moussa M., Khay I., Ben Zineb T. A Comprehensive Review on Thermal and Hygro/Hydrothermal Aging of Plant Fiber Composites: Properties, Degradation Mechanisms, and Service Life Prediction. *Polymer Composites*, 2025, vol. 46, no. 16, pp. 14576–14620.
15. Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Sidorina A.I., Soloveva N.A. Fatigue of constructional organoplastics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 1, pp. 89–100. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 10, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-89-100.
16. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 70–80. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 10, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
17. Erofeev V.T., Smirnov I.V., Voronov P.V., Afonin V.V., Kablov E.N., Startsev O.V., Startsev V.O., Medvedev I.M. Study of the durability of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2016, no. 11, pp. 911–924.
18. Startsev V.O., Nizina T.A. The modeling of epoxy polymers weathering by the color characteristics measurements. *Trudy VIAM*, 2015, no. 12, pp. 80–85. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 10, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-10-10.
19. Startsev V.O., Frolov A.S. Influence of climatic influence on the color characteristics of paint and varnish coatings. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2015, no. 3, pp. 16–18.
20. Shahid A.T., Garrido M., Correia J.R. Durability under natural outdoor weathering of sustainable composites developed with bio-based unsaturated polyester and epoxy resins reinforced with glass, basalt, and carbon fibres. *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 505, p. 144651.
21. Haider I., Khan M.A., Aziz S. et al. Exploring the Weathering and Accelerated Environmental Aging of Wave-Transparent Reinforced Composites. *Polymers*, 2025, vol. 17, no. 3, p. 357.
22. Startsev O.V., Veligodsky I.M., Medvedev I.M., Gladkikh A.V., Gorbovets M.A. Measurement of Strength and Fracture Load of Weathered Samples of Polymer Composite Materials. *Polymer Science. Series D*, 2024, vol. 17, no. 2, pp. 302–310.
23. *Aging Effects on Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites*. Eds. C. Muthukumar, S. Krishnasamy, S.M.K. Thiagamani, S. Siengchin. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. 350 p.
24. Hao Z.-H., Zeng J.-J., Chen G.-M. et al. Durability of FRP-to-concrete bonded joints subjected to 110 months accelerated laboratory and field exposure. *Engineering Structures*, 2024, vol. 305, p. 117681.
25. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K. The effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 3, p. e03481.
26. Koval T.V., Veligodsky I.M., Gromova A.A. Study of the plasticizing effect of moisture on the properties of VSE-34 binder based PCMS after 5 years exposure in the different climate zones. *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), pp. 105–116. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 10, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-105-116.
27. Startsev V.O., Molokov M.V., Postnov V.I., Starostina I.V. Assessment of the influence of climatic exposure on the properties of fiberglass VPS-53K. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii nauk*, 2017, vol. 19, no. 4 (2), pp. 220–228.
28. 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.
29. Kornienko G.V., Startsev O.V., Krotov A.S., Koval T.V. Dependence modeling of the CFRP shear modulus on moisture content. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 161–178. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 10, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-161-178.

30. Startsev V.O., Panin S.V., Startsev O.V. Sorption and diffusion of moisture in polymer composite materials with impact damage. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2015, vol. 51, no. 6, pp. 1081–1094.
31. Filistovich D.V., Startsev O.V., Kuznetsov A.A. et al. Effect of moisture on the anisotropy of the dynamic shear modulus of glass-reinforced plastics. *Doklady Physics*, 2003, vol. 48, no. 6, pp. 306–308.
32. Startsev O.V., Krotov A.S., Senatorova O.G. et al. Sorption and diffusion of moisture in layered metal-polymer composite materials of the SIAL type. *Materialovedenie*, 2011, no. 12, pp. 38–44.
33. Kablov E.N., Startsev O.V., Panin S.V. Moisture transfer in carbon-fiber-reinforced plastic with degraded surface. *Doklady Physical Chemistry*, 2015, vol. 461, no. 2, pp. 80–83.
34. Startsev O.V., Makhonkov A.Y., Erofeev V., Gudojnikov S. Impact of moisture content on dynamic mechanical properties and transition temperatures of wood. *Wood Material Science and Engineering*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 55–62.
35. Carslaw G., Eger D. *Thermal Conductivity of Solids*. Moscow: Nauka, 1964, 488 p.
36. Lykov A.V. *Theory of Thermal Conductivity*. Moscow: Vysshaya Shkola, 1967, 600 p.
37. Crank J. *The mathematics of diffusion*. Second ed. Oxford: Clarendon press, 1975, 414 p.

Информация об авторах

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

Нечаев Александр Андреевич, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Aleksandr A. Nechaev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 12.05.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.05.2026.
The article was submitted 12.05.2026; approved and accepted for publication after reviewing 13.05.2026.