

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-89-100

**ПРОЧНОСТЬ И ВЛАГОСТОЙКОСТЬ СТЕКЛОПЛАСТИКА ВПС-53/Т-25
НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ НАТУРНОГО И УСКОРЕННОГО СТАРЕНИЯ***В.О. Старцев¹, О.В. Старцев², М.Р. Павлов¹, А.А. Нечаев¹*

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия; administration@iptpn.ysn.ru

Аннотация. Проведены сравнительные испытания на стойкость стеклопластика ВПС-53/Т-25 к старению при экспонировании в натуральных условиях умеренно теплого и умеренного климата в течение 3 и 6 мес. и к имитационным воздействиям при двух режимах лабораторных ускоренных испытаний. Установлено, что за 6 мес. экспонирования прочность стеклопластика уменьшилась на 7 %, тогда как коэффициент диффузии влаги при режимах увлажнения и сушки повысился на 60 и 120 % соответственно. Показана перспективность использования моделей Фика и Ленгмюра для сравнения эффектов старения полимерных композиционных материалов при испытаниях в натуральных и лабораторных условиях.

Ключевые слова: стеклопластик, климатическое старение, натурная экспозиция, ускоренные испытания, прочность, коэффициент диффузии влаги, сорбция, десорбция

Для цитирования: Старцев В.О., Старцев О.В., Павлов М.Р., Нечаев А.А. Прочность и влагостойкость стеклопластика ВПС-53/Т-25 на начальной стадии натурального и ускоренного старения // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-89-100.

Scientific article

**STRENGTH AND MOISTURE RESISTANCE
OF FIBERGLASS PLASTIC VPS-53/T-25
AT THE INITIAL STAGE OF NATURAL AND ACCELERATED AGING***V.O. Startsev¹, O.V. Startsev², M.R. Pavlov¹, 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

²V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences Federal state Budgetary Institution of Science, Yakutsk, Russia; administration@iptpn.ysn.ru

Abstract. Comparative tests of the resistance of fiberglass VPS-53/T-25 to aging were conducted during exposure in natural conditions of moderately warm and moderate climate for 3 and 6 months and to simulating effects in two modes of laboratory accelerated tests. It was found that during 6 months of exposure the strength of fiberglass decreased by 7 %, while the moisture diffusion coefficient increased by 60 and 120 % accordingly. The prospects of using Fick and Langmuir models for comparing the effects of composite materials aging during tests in natural and laboratory conditions were shown.

Keywords: fiberglass, climatic aging, full-scale exposure, accelerated testing, strength, moisture diffusion coefficient, sorption, desorption

For citation: Startsev V.O., Startsev O.V., Pavlov M.R., Nechaev A.A. Strength and moisture resistance of fiber-glass plastic VPS-53/T-25 at the initial stage of natural and accelerated aging. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-89-100.

Введение

В нашей стране создаются новые стеклопластики, углепластики и другие полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1–3], которые не только удовлетворяют растущие потребности авиастроения и других отраслей машиностроения, но и обеспечивают технологический суверенитет Российской Федерации [4]. Достоинствами новых материалов являются высокий уровень механических показателей R и возможность длительного использования в разнообразных элементах авиационной техники.

Согласно отечественным и зарубежным стандартам [5, 6], для обоснования длительной работоспособности ПКМ измеряются механические показатели после длительного пребывания в натуральных климатических условиях [7, 8], после ускоренных лабораторных испытаний [9] или их сочетаний [10, 11].

Для обеспечения необходимого методического уровня используется передовой зарубежный опыт [12–15] и отечественные разработки [16]. Закономерным следствием климатического воздействия является ухудшение механических показателей ПКМ [17]. Однако это происходит в течение длительного времени [13, 14]. Если требуется принятие оперативного решения о возможности применения нового материала, то часто приходится использовать сведения об изменении свойств ПКМ после непродолжительных испытаний, когда механические показатели изменились незначительно. В таких случаях используют разнообразные физические показатели, чувствительные к процессам старения ПКМ на ранних стадиях старения [15, 16, 18, 19].

Одним из таких показателей является коэффициент диффузии влаги D , определяемый при сушке или увлажнении в стационарных температурных условиях [20]. Этот показатель выявляет количество сорбированной влаги w и ее распределение в образцах ПКМ при различных уровнях температуры и относительной влажности воздушной атмосферы [21–23] или после нахождения в воде [24–26]. В работах [27–31] показано изменение показателей влагопереноса D , w и механических свойств R при климатическом старении образцов ПКМ разных составов, форм и размеров. Поэтому изменения D , w на начальных стадиях климатических испытаний представляют интерес для сопоставления с изменениями R и оценки чувствительности к старению ПКМ.

В работе [10] сравнили старение углепластика на основе цианэфирной матрицы при экспозиции в условиях умеренного климата и лабораторных имитационных испытаниях. При имитационных лабораторных испытаниях [32] использованы режимы термовлажностного воздействия, выдержка при отрицательной температуре, переходы от отрицательной к положительной температуре и ультрафиолетовое облучение. Предполагался принцип суперпозиции воздействующих факторов: арифметическое суммирование результатов воздействия должно обеспечивать итоговый результат, соответствующий реальному климатическому воздействию. Чтобы фиксировать все необратимые изменения прочности ПКМ, измерения выполняли сразу после съема без дополнительного кондиционирования и после сушки образцов, исключаяющей обратимый пластифицирующий эффект влаги.

Через 24 мес. сравнили коэффициенты сохранения показателей $k = \sigma_R / \sigma_{R0}$, где R – пределы прочности при изгибе σ_b и сжатии σ_c , индекс 0 относится к значениям механического показателя в исходном состоянии. Обнаружены различия в результатах имитационных и натуральных испытаний. Например, показатель σ_b после 12 мес. экспонирования в открытых климатических условиях г. Москвы уменьшился на 11 %, а после

имитационных испытаний – только на 4 %. Возможной причиной обнаруженного несоответствия стала разная степень дополимеризации полимерной матрицы в условиях натурального и искусственного старения.

При таком способе проведения ускоренных лабораторных испытаний требуется обосновать принцип суперпозиции повреждений при последовательном чередовании агрессивных воздействий. Можно ожидать, что изменение порядка чередования имитационных факторов в лабораторных условиях приведет к иному совокупному результату по дополимеризации, деструкции, структурной релаксации полимерных матриц в ПКМ при сопоставлении с непрерывным суточным и сезонным циклированием температуры, влажности и ультрафиолетового облучения в открытых климатических условиях.

В связи с отмеченными проблемами в данной работе проанализированы результаты измерений предела прочности при изгибе и показателей влагопереноса стеклопластика ВПС-53/Т-25 после 3 и 6 мес. экспонирования в двух климатических зонах и имитационных испытаний по режимам, отличающимся очередностью агрессивных воздействий.

Материалы и методы

Для исследований выбран стеклопластик ВПС-53/Т-25 на основе стеклянной ткани марки Т-25(ВМП) и связующего ВСЭ-34 [1, 33, 34].

Плиты стеклопластика экспонировали на открытых стендах в условиях умеренно теплого климата Геленджикского центра климатических испытаний ВИАМ (ГЦКИ) и умеренного климата Московского центра климатических испытаний ВИАМ (МЦКИ). Среднегодовые климатические показатели мест экспонирования указаны в работах [16, 34].

Ускоренные (в течение 1 года) климатические испытания (УКИ), имитирующие пребывание на открытом воздухе в условиях умеренного климата, проведены по двум режимам.

Режим УКИ 1 выполнен путем последовательного проведения следующих воздействий:

– повышенная температура 40 °С и относительная влажность воздуха 93 % в течение 19 сут (ГОСТ Р 51369–99 (метод 207-2) [32]);

– отрицательная температура – согласно ГОСТ 9.707–81 (метод 2), п. 2.5.3. [35] (согласно ГОСТ 16350–80 [36], при –41 °С в течение 6 ч);

– перепады температуры с переходом через 0 °С – по ГОСТ 9.707–81 (метод 2), п. 2.5.4.7 [35] (согласно ГОСТ 16350–80 [36], 56 часовых циклов перепадов от –15 до 25 °С соответствует максимальному количеству дней в году с переходом температуры через нулевое значение);

– солнечное излучение в течение 58 сут при интегральной плотности потока излучения 1120 Вт/м² и плотности потока излучения 65 Вт/м² в интервале длин волн 300–400 нм до достижения дозы суммарного солнечного излучения 5612 МДж/м² – в соответствии с ГОСТ Р 51370–99 [37].

Режим УКИ 2 выполнен путем последовательного проведения следующих воздействий:

– солнечное излучение в непрерывном режиме, совмещенное с воздействием повышенной влажности воздуха, в течение 47 сут при интегральной плотности потока излучения 1400 Вт/м² и плотности потока излучения 80 Вт/м² в интервале длин волн 300–400 нм до достижения дозы суммарного солнечного излучения 5612 МДж/м²;

– экспонирование в течение 14 сут при температуре воздуха 45 °С без контроля относительной влажности, затем в течение 9,5 сут – при 40 °С и относительной влажности 93 %, в следующие 14 сут – при 45 °С без контроля относительной влажности, в оставшиеся 9,5 сут до конца воздействия – при 40 °С и относительной влажности 93 %;

– выдержка при отрицательной температуре – согласно ГОСТ 9.707–81 (метод 2), п. 2.5.3 [35] (согласно ГОСТ 16350–80 [36], при $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 6 ч);

– перепады температуры с переходом через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – по ГОСТ 9.707–81 (метод 2), п. 2.5.4.7 [35]: $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч и $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч (проведено 56 циклов по ГОСТ 16350–80 [36], что соответствует максимальному количеству дней в году с переходом температуры через нулевое значение).

После достижения заданного времени пластины снимали с испытаний и измеряли предел прочности при изгибе σ_b по ГОСТ Р 56805–2015. Использовали исходные и экспонированные образцы без дополнительного кондиционирования (без сушки) и образцы, высушенные при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 14 сут.

Предварительно высушенные образцы размерами 50×302 мм использованы для исследования влагопереноса по двум последовательным режимам: увлажнение при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $98 \pm 2\%$ в течение 28 сут и сушка при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в эксикаторе с прокаленным силикагелем в течение 28 сут. В течение указанного времени массу образцов измеряли на аналитических весах с чувствительностью 10^{-4} г.

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

Результаты и обсуждение

В данной работе рассмотрены результаты начального этапа сравнительных климатических испытаний. В табл. 1 показано влияние режимов и продолжительности старения на предел прочности при изгибе σ_b .

Таблица 1

Влияние режимов и продолжительности старения на предел прочности при изгибе стеклопластика ВПС-53/Т-25

Состояние	Продолжительность старения, мес.	Без сушки		После сушки		$\frac{\sigma_b \text{ без сушки}}{\sigma_b \text{ после сушки}}$
		σ_b , МПа	k	σ_b , МПа	k	
Исходное	0	1322 ± 21	1,00	1350 ± 21	1,00	0,98
Состаренное: в ГЦКИ	3	1220 ± 66	0,92	1293 ± 38	0,96	0,94
	6	1183 ± 20	0,90	1253 ± 30	0,93	0,94
в МЦКИ	3	1193 ± 35	0,90	1327 ± 27	0,98	0,90
	6	1150 ± 61	0,87	1330 ± 35	0,99	0,87
по режиму УКИ 1	6	1155 ± 100	0,87	1250 ± 26	0,93	0,92
	12	1257 ± 42	0,95	1255 ± 62	0,93	1,00
	18	1245 ± 28	0,94	1205 ± 38	0,89	1,00
по режиму УКИ 2	6	1158 ± 38	0,88	1195 ± 9	0,89	0,97
	12	1118 ± 35	0,85	1160 ± 74	0,86	0,96
	18	1186 ± 44	0,90	1213 ± 27	0,90	0,98

Примечание. $k = \sigma_b / \sigma_{b0}$.

Предполагая несущественное изменение показателей R стеклопластика на ранних стадиях старения, для измерения σ_b использовано по пять параллельных образцов, что позволило определить вероятные отклонения в каждой выборке, указанные в третьем и пятом столбцах табл. 1. Среднее значение вероятного отклонения измеренных значений образцов без сушки составило 3,4 % от σ_{b0} , а после сушки уменьшилось до 2,6 %. Следовательно, если коэффициенты сохранения показателя $k = \sigma_b / \sigma_{b0}$ отличаются более чем на 0,04, то это указывает на значимое отличие σ_b от исходного состояния σ_{b0} .

Необратимое уменьшение предела прочности при изгибе после 6 мес. экспонирования в ГЦКИ составило 7 %, а в МЦКИ – только 1 % (табл. 1). Такой результат соответствует общей закономерности [16], согласно которой умеренно теплый климат более агрессивен по отношению к ПКМ, чем умеренный. Снижение k до 0,87 после 6 мес. экспонирования в МЦКИ вызвано пластифицирующим действием сорбированной влаги, которое отсутствует после сушки.

Сравнение результатов воздействия режимов УКИ 1 и 2 в течение 6 мес. по показателю k после сушки показало их неэквивалентность (0,93 и 0,89 соответственно). Это позволяет предположить, что ультрафиолетовое облучение в сочетании с термовлажностным воздействием и температурными перепадами оказывает более активное влияние на свойства стеклопластика ВПС-53/Т-25 при имитации старения в течение 6 мес. Однако после имитации старения в течение 18 мес. по режимам УКИ 1 и 2 выявлено одинаковое воздействие, в результате которого необратимое изменение σ_b составляет 10–11 % (табл. 1).

На рис. 1 показаны три стадии влагопереноса образцов стеклопластика ВПС-53/Т-25 в исходном состоянии и после старения в ГЦКИ и МЦКИ в течение 3 и 6 мес. Начальная стадия соответствует предварительной сушке, за время которой определено количество накопленной влаги. Затем следуют стадии увлажнения и сушки. Для аппроксимации зависимостей относительного содержания влаги от времени $w(t)$ использовали второй закон Фика в одномерном приближении.

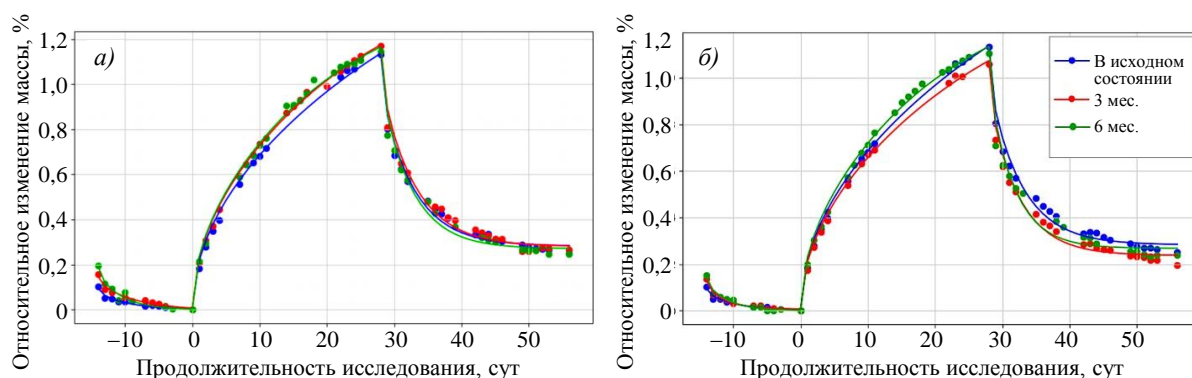


Рис. 1. Сравнение кинетики влагопереноса в стеклопластике в исходном состоянии и после натурной экспозиции в г. Геленджике (а) и г. Москве (б) в течение 3 и 6 мес.: ● – экспериментальные данные; — аппроксимация с использованием модели Фика

С помощью вычислений, проведенных согласно рекомендациям работ [38–40], определены значения коэффициента диффузии влаги D , а также предельного влагосодержания по формуле

$$w_{\max} = \frac{m_{\max} - m_0}{m_0} \cdot 100 \%,$$

где m_0 – масса предварительно высушенного образца; m_{\max} – масса образца с максимальным содержанием влаги.

Результаты вычислений для всех серий испытанных образцов представлены в табл. 2.

Коэффициент детерминации модели Фика оказался высоким и изменялся от 0,970 до 0,984. Для достижения более высокой точности использована также одномерная модель Ленгмюра, в которой, кроме показателей D и w_{\max} , вычисляются также

вероятности в единицу времени превращения связанной воды в мобильную (β) и мобильной воды в связанную (γ) по рекомендациям работ [41–43].

Таблица 2

Влияние режимов и продолжительности старения на показатели модели Фика

Состояние	Продолжительность старения, мес.	После увлажнения		После сушки	
		D , мм ² /сут	w_{\max} , %	D , мм ² /сут	w_{\max} , %
Исходное	0	0,011	1,8	0,083	0,85
Состаренное: в ГЦКИ	3	0,017	1,6	0,079	0,89
	6	0,020	1,5	0,089	0,89
в МЦКИ	3	0,015	1,5	0,090	0,84
	6	0,020	1,4	0,106	0,87
по режиму УКИ 1	6	0,020	1,5	0,074	0,92
	12	0,026	1,4	0,101	0,93
	18	0,031	1,2	0,095	0,96
по режиму УКИ 2	6	0,017	1,5	0,088	0,89
	12	0,019	1,5	0,076	0,91
	18	0,025	1,3	0,088	0,90

Примечание. D – коэффициент диффузии влаги, w_{\max} – влагосодержание.

На рис. 2 показано сравнение кинетических кривых $w(t)$ по модели Ленгмюра для исходных образцов и образцов, испытанных по режимам УКИ 1 и 2. Сопоставление показателей влагопереноса в стеклопластике ВПС-53/Т-25 после старения по всем изученным режимам представлено в табл. 3.

Модель Ленгмюра повысила коэффициент детерминации до $0,9990 \pm 0,0005$, т. е. показала полное соответствие измеренным значениям влагопоглощения. Проанализировано изменение показателей D и w_{\max} в течение 6 мес. испытаний. На стадии сорбции при практически стабильном значении w_{\max} показатель D увеличился на 15 и 60 % после экспозиции в ГЦКИ и МЦКИ соответственно. При этом на стадии сушки прирост коэффициента диффузии при десорбции влаги составил 123 и 77 % соответственно. Из этого следует главный вывод: коэффициент диффузии влаги более чувствителен к физико-химическим превращениям в эпоксидной полимерной матрице, происходящим при старении, чем предел прочности при изгибе.

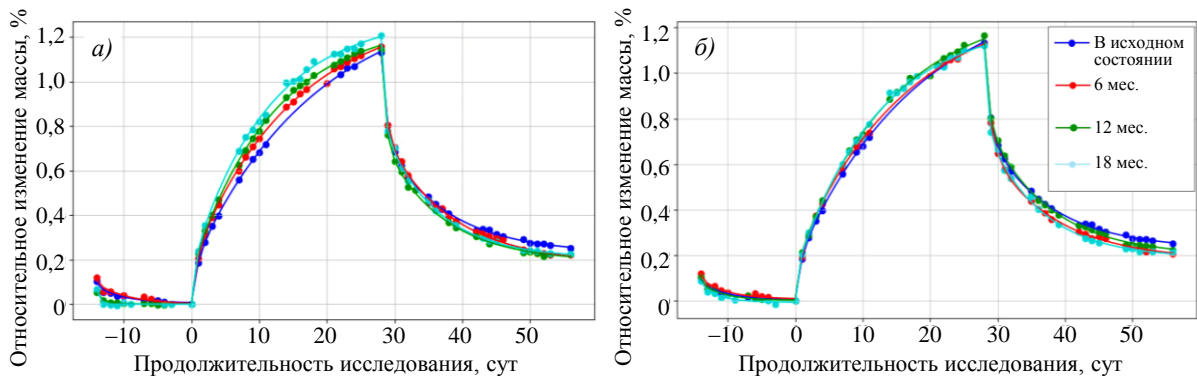


Рис. 2. Сравнение кинетики влагопереноса в стеклопластике в исходном состоянии и после старения по режимам УКИ 1 (а) и 2 (б) в течение 6, 12 и 18 мес.: ● – экспериментальные данные; — аппроксимация с использованием модели Ленгмюра

Значительная часть сорбированной влаги осталась в объеме стеклопластика после завершения стадии повторной сушки, по-видимому, в результате химического взаимодействия с гидрофильными группами связующего ВСЭ-34. Этот вывод подтверждается сравнением показателей β и γ : на стадии увлажнения возрастает вероятность превращения мобильной воды в связанную (γ увеличивается от 0,43 до 0,64), и эта тенденция сохраняется на стадии сушки (γ увеличивается от 0,14 до 0,24 после старения в г. Геленджике).

Таблица 3

Влияние режимов и продолжительности старения на показатели модели Ленгмюра

Состояние	Продолжительность старения, мес.	После увлажнения				После сушки			
		D , мм ² /сут	w_{\max} , %	β , сут ⁻¹	γ , сут ⁻¹	D , мм ² /сут	w_{\max} , %	β , сут ⁻¹	γ , сут ⁻¹
Исходное	0	0,48	1,4	0,055	0,43	0,44	0,91	0,11	0,14
Состаренное: в ГЦКИ	3	0,48	1,4	0,061	0,39	0,68	0,93	0,12	0,20
	6	0,55	1,3	0,072	0,64	0,98	0,92	0,13	0,24
в МЦКИ	3	0,47	1,3	0,063	0,48	0,41	0,88	0,11	0,13
	6	0,77	1,3	0,071	0,56	0,78	0,92	0,11	0,13
по режиму УКИ 1	6	0,45	1,3	0,067	0,42	0,49	0,97	0,10	0,16
	12	1,01	1,3	0,084	0,62	0,61	0,97	0,11	0,15
	18	0,68	1,3	0,089	0,58	0,80	1,00	0,13	0,20
по режиму УКИ 2	6	0,40	1,3	0,062	0,39	0,38	0,95	0,10	0,12
	12	0,84	1,3	0,072	0,56	0,57	0,95	0,11	0,19
	18	0,91	1,2	0,082	0,75	0,81	0,93	0,12	0,21

Примечание. D – коэффициент диффузии влаги, w_{\max} – влагосодержание, β и γ – вероятности в единицу времени превращения связанной воды в мобильную и мобильной воды в связанную.

После продолжения испытаний до 18–24 мес. можно ожидать дальнейшее изменение показателя k и характеристик влагопереноса D и w_{\max} , что позволит более обоснованно сопоставить эквивалентность режимов УКИ 1 и 2, выяснить причины возможных различий и дать рекомендации по выбору режимов ускоренных испытаний ПКМ.

Заключения

Экспонирование стеклопластика ВПС-53/Т-25 в открытых условиях умеренного и умеренно теплого климата приводит к необратимому изменению предела прочности при изгибе на 1–7 %, что подтверждает высокую климатическую стойкость материала, определенную в работах [33, 34].

Сравнение результатов воздействия режимов УКИ 1 и 2 по показателю k после сушки показало их неэквивалентность (0,93 и 0,89 соответственно).

При таких незначительных изменениях механического показателя выявлена высокая чувствительность коэффициента диффузии влаги, который в режиме увлажнения повысился на 15 и 60 % после экспозиции в ГЦКИ и в МЦКИ, в режиме сушки – на 123 и 77 % соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности оценки климатической стойкости современных ПКМ на ранних стадиях климатического воздействия по показателям влагопереноса.

Список источников

1. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

2. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексашин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
3. Гуняева А.Г., Курносоев А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
4. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
5. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Сутубалов А.И. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 1. Растяжение // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.
6. Шершак П.В., Сутубалов А.И., Яковлев Н.О., Шерстюк Ф.А. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 2. Сжатие // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
7. 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.
8. 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). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
9. Мишуров К.С., Павловский К.А., Имамединов Э.Ш. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-27Л // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-60-67.
10. Старцев В.О., Нечаев А.А. Влияние натуральных и ускоренных климатических испытаний на прочность наномодифицированного углепластика // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-134-151.
11. Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние эксплуатационных факторов на свойства углепластика на основе полиэфирэфиркетона // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.
12. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of Fibreglass Composites under Natural Weathering Conditions // MOJ Polymer Science. 2017. Vol. 1. No. 1. P. 18–24.
13. Nishizaki I., Kishima T., Sasaki I. Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests // Third International Conference on Durability & Field Applications of FRP Composites for Construction. Quebec, 2007. P. 159–166.
14. Nishizaki I., Sasaki I., Tomiyama T. Outdoor exposure tests of pultruded CFRP plates // Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012). Rome, 2012. Paper 11-096.
15. Cruz R., Correia L., Dushimimana A. et al. Durability of Epoxy Adhesives and Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates Used in Strengthening Systems: Accelerated Ageing versus Natural Ageing // Materials. 2021. Vol. 14. No. 6. P. 1533.
16. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
17. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. М., 2015. Т. 13: Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. 270 с.

18. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis // *Mechanics of Composite Materials*. 2020. Vol. 56. No. 2. P. 227–240.
19. Koval' T.V., Veligodskii I.M., Gromova A.A. Change in the Properties of BSR-3M Binder in VKU-46 Carbon-Fiber-Reinforced Polymer after Prolonged Climatic Aging // *Polymer Science. Ser.: D*. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 687–693.
20. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2023. Vol. 62. No. 14. P. 1789–1822.
21. Loos A.C., Springer G.S. Moisture Absorption of Graphite-Epoxy Composites Immersed in Liquids and in Humid Air // *Journal of Composite Materials*. 1979. Vol. 13. No. 2. P. 131–147.
22. Mei J., Tan P.J., Liu J. et al. Moisture absorption characteristics and mechanical degradation of composite lattice truss core sandwich panel in a hygrothermal environment // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. Vol. 127. Art. 105647.
23. Scott P., Toumpanaki E., Lees J.M. Solution Uptake in Cylindrical Carbon-Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Tendons // *Advances in Polymer Technology*. 2022. Vol. 2022. Art. 1981256.
24. Almudaihesh F., Holford K., Pullin R., Eaton M. A comparison study of water diffusion in unidirectional and 2D woven carbon/epoxy composites // *Polymer Composites*. 2022. Vol. 43. No. 1. P. 118–129.
25. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. et al. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite // *Journal of Composite Materials*. 2022. Vol. 56. No. 14. P. 2189–2199.
26. Aithal S., Hossagadde P.N., Kini M.V., Pai D. Durability study of quasi-isotropic carbon/epoxy composites under various environmental conditions // *Iranian Polymer Journal*. 2023. Vol. 32. No. 7. P. 873–885.
27. Hussnain S.M., Shah S.Z.H., Megat-Yusoff P.S.M., Hussain M.Z. Degradation and mechanical performance of fibre-reinforced polymer composites under marine environments: A review of recent advancements // *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 215. Art. 110452.
28. Mayandi K., Rajini N., Ayrilmis N. et al. An overview of endurance and ageing performance under various environmental conditions of hybrid polymer composites // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. No. 6. P. 15962–15988.
29. Kychkin A.K., Gavriliyeva A.A., Vasilieva A.A. et al. Assessment of Extremely Cold Subarctic Climate Environment Destruction of the Basalt Fiber Reinforced Epoxy (BFRE) Rebar Using Its Moisture Uptake Kinetics // *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 24. Art. 4325.
30. Kychkin A.K., Gavriliyeva A.A., Kychkin A.A. et al. The Initial Stage of Climatic Aging of Basalt-Reinforced and Glass-Reinforced Plastics in Extremely Cold Climates: Regularities // *Polymers*. 2024. Vol. 16. No. 7. Art. 866.
31. Кычкин А.К., Гаврильева А.А., Васильева Е.Д. и др. Исследование стекло- и базальтотекстолитов по кинетике сорбции и десорбции влаги после экспонирования в условиях холодного климата // *Вестник машиностроения*. 2024. Т. 103. № 4. С. 336–342.
32. ГОСТ Р 51369–99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие влажности. М.: Изд-во стандартов, 2000. 15 с.
33. 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). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-105-116.
34. 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.
35. ГОСТ 9.707–81. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. М.: Изд-во стандартов, 1990. 79 с.

36. ГОСТ 16350–80. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. М.: Изд-во стандартов, 1981. 150 с.
37. ГОСТ Р 51370–99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытание на воздействие солнечного излучения. М.: Изд-во стандартов, 2000. 11 с.
38. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
39. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
40. Crank J. The mathematics of diffusion. 2nd ed. Oxford: Clarendon press, 1975. 414 p.
41. Bonniau P., Bunsell A.R. A comparative study of water absorption theories applied to glass epoxy composites // *Journal of Composite Materials*. 1981. Vol. 15. No. 5. P. 272–293.
42. Carter H.G., Kibler K.G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins // *Journal of Composite Materials*. 1978. Vol. 12. No. 5. P. 118–131.
43. Glaskova T.I., Guedes R.M., Morais J.J., Aniskevich A.N. A comparative analysis of moisture transport models as applied to an epoxy binder // *Mechanics of Composite Materials*. 2007. Vol. 43. No. 4. P. 377–388.

References

1. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. Kablov E.N., Valueva M.I., Zelenina I.V., Khmel'nitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
3. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aerospace engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
4. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
5. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Sutubalov A.I. Standards for testing polymer composite materials. Part 1. Tensile properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.
6. Shershak P.V., Sutubalov A.I., Yakovlev N.O., Sherstyuk F.A. Standards test methods for polymer matrix composite materials. Part 2. Compression properties. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
7. 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.
8. 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), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
9. Mishurov K.S., Pavlovskiy K.A., Imametdinov E.Sh. Environmental effects on properties of CFRP (carbon fiber reinforced plastic) VKU-271. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (63), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-60-67.
10. Startsev V.O., Nechaev A.A. The influence of natural and accelerated weathering on the nanomodified CFRP'S strength. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-134-151.

11. Ivanov M.S., Morozova V.S., Pavlukovich N.G. The influence of operational factors on the properties of carbon fiber based on polyetheretherketone. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.
12. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of Fibreglass Composites under Natural Weathering Conditions. *MOJ Polymer Science*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 18–24.
13. Nishizaki I., Kishima T., Sasaki I. Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests. *Third International Conference on Durability & Field Applications of FRP Composites for Construction*. Quebec, 2007, pp. 159–166.
14. Nishizaki I., Sasaki I., Tomiyama T. Outdoor exposure tests of pultruded CFRP plates. *Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012)*. Rome, 2012, paper 11-096.
15. Cruz R., Correia L., Dushimimana A. et al. Durability of Epoxy Adhesives and Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates Used in Strengthening Systems: Accelerated Ageing versus Natural Ageing. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 6, p. 1533.
16. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
17. *Aviation materials: reference book in 13 vols*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2015, vol. 13: Climatic and microbiological resistance of non-metallic materials, 270 p.
18. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis. *Mechanics of Composite Materials*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 227–240.
19. Koval' T.V., Veligodskii I.M., Gromova A.A. Change in the Properties of BSR-3M Binder in VKU-46 Carbon-Fiber-Reinforced Polymer after Prolonged Climatic Aging. *Polymer Science. Ser.: D*, 2023, vol. 16, no. 3, pp. 687–693.
20. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2023, vol. 62, no. 14, pp. 1789–1822.
21. Loos A.C., Springer G.S. Moisture Absorption of Graphite-Epoxy Composites Immersed in Liquids and in Humid Air. *Journal of Composite Materials*, 1979, vol. 13, no. 2, pp. 131–147.
22. Mei J., Tan P.J., Liu J. et al. Moisture absorption characteristics and mechanical degradation of composite lattice truss core sandwich panel in a hygrothermal environment. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 127, art. 105647.
23. Scott P., Toumpanaki E., Lees J.M. Solution Uptake in Cylindrical Carbon-Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Tendons. *Advances in Polymer Technology*, 2022, vol. 2022, art. 1981256.
24. Almudaihesh F., Holford K., Pullin R., Eaton M. A comparison study of water diffusion in unidirectional and 2D woven carbon/epoxy composites. *Polymer Composites*, 2022, vol. 43, no. 1, pp. 118–129.
25. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. et al. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, 2022, vol. 56, no. 14, pp. 2189–2199.
26. Aithal S., Hossagadde P.N., Kini M.V., Pai D. Durability study of quasi-isotropic carbon/epoxy composites under various environmental conditions. *Iranian Polymer Journal*, 2023, vol. 32, no. 7, pp. 873–885.
27. Hussnain S.M., Shah S.Z.H., Megat-Yusoff P.S.M., Hussain M.Z. Degradation and mechanical performance of fibre-reinforced polymer composites under marine environments: A review of recent advancements. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, vol. 215, art. 110452.
28. Mayandi K., Rajini N., Ayrilmis N. et al. An overview of endurance and ageing performance under various environmental conditions of hybrid polymer composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 15962–15988.
29. Kychkin A.K., Gavrilieva A.A., Vasilieva A.A. et al. Assessment of Extremely Cold Subarctic Climate Environment Destruction of the Basalt Fiber Reinforced Epoxy (BFRE) Rebar Using Its Moisture Uptake Kinetics. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 24, art. 4325.

30. Kychkin A.K., Gavrilieva A.A., Kychkin A.A. et al. The Initial Stage of Climatic Aging of Basalt-Reinforced and Glass-Reinforced Plastics in Extremely Cold Climates: Regularities. *Polymers*, 2024, vol. 16, no. 7, art. 866.
31. Kychkin A.K., Gavrilyeva A.A., Vasilyeva E.D. et al. Study of glass and basalt textolites by the kinetics of moisture sorption and desorption after exposure to cold climate conditions. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2024, vol. 103, no. 4, pp. 336–342.
32. State Standard R 51369–99. *Test methods for resistance to climatic external influencing factors of machines, devices and other technical products. Tests for exposure to humidity*. Moscow: Publishing House of Standards, 2000, 15 p.
33. 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), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-105-116.
34. Startsev V.O., Molokov M.V., Postnov V.I., Starostina I.V. Assessment of the influence of climatic impact on the properties of fiberglass VPS-53K. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii nauk*, 2017, vol. 19, no. 4 (2), pp. 220–228.
35. State Standard 9.707–81. *Unified system of protection against corrosion and aging. Polymer materials. Methods of accelerated tests for climatic aging*. Moscow: Publ. house of standards, 1990, 79 p.
36. State Standard 16350–80. *Zoning and statistical parameters of climatic factors for technical purposes*. Moscow: Publ. house of standards, 1981, 150 p.
37. State Standard R 51370–99. *Methods of testing resistance to climatic external influencing factors of machines, devices and other technical products. Testing for exposure to solar radiation*. Moscow: Publ. House of Standards, 2000, 11 p.
38. Carslow G., Eger D. *Thermal conductivity of solids*. Moscow: Nauka, 1964, 488 p.
39. Lykov A.V. *Theory of thermal conductivity*. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p.
40. Crank J. *The mathematics of diffusion*. 2nd ed. Oxford: Clarendon press, 1975, 414 p.
41. Bonniau P., Bunsell A.R. A comparative study of water absorption theories applied to glass epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 1981, vol. 15, no. 5, pp. 272–293.
42. Carter H.G., Kibler K.G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins. *Journal of Composite Materials*, 1978, vol. 12, no. 5, pp. 118–131.
43. Glaskova T.I., Guedes R.M., Morais J.J., Aniskevich A.N. A comparative analysis of moisture transport models as applied to an epoxy binder. *Mechanics of Composite Materials*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 377–388.

Информация об авторах

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

Старцев Олег Владимирович, и. о. директора, д.т.н., ИФТПС СО РАН, administration@iptpn.ysn.ru

Павлов Михаил Рашитович, ведущий научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Нечаев Александр Андреевич, инженер, 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

Oleg V. Startsev, Acting Director, Doctor of Sciences (Tech.), V.P. Laronov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS Federal state Budgetary Institution of Science, administration@iptpn.ysn.ru

Mikhail R. Pavlov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 28.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.11.2024.
The article was submitted 28.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 12.11.2024.