

Научная статья

УДК 539.3:620.17

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-75-93

## ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ АВИАЦИОННЫХ ПКМ ПОСЛЕ 6 ЛЕТ ЭКСПОЗИЦИИ В ТИПОВЫХ ЗОНАХ РОССИИ Часть 1. Влагоперенос и деформативность

Г.В. Корниенко<sup>1</sup>, Е.В. Двирная<sup>1</sup>, О.В. Старцев<sup>1,2</sup>, А.С. Кротов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Федеральное 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 исследования изменения диффузионных характеристик стеклопластика и углепластиков в исходном состоянии и после экспозиции в течение шести лет в пяти климатических зонах РФ. Значение коэффициента достоверности аппроксимации моделями Фика и Ленгмюра для результатов взвешивания, полученных на этапах сушки и увлажнения, равно 1,00. В ходе кондиционирования с помощью неразрушающего метода кручения получены диаграммы изменения модуля сдвига, которые были аппроксимированы аналогичными моделями. Результаты моделирования позволили различить влияние климатических зон на свойства материалов.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, климатическое старение, диффузия влаги, пластификация, модуль сдвига, второй закон Фика, модель Ленгмюра

**Для цитирования:** Корниенко Г.В., Двирная Е.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Изменение свойств авиационных ПКМ после 6 лет экспозиции в типовых зонах России. Часть 1. Влагоперенос и деформативность // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 75–93. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-75-93.

Scientific article

## CHANGES IN THE PROPERTIES OF AVIATION PCM AFTER 6 YEARS OF EXPOSURE IN TYPICAL CLIMATIC ZONES OF RUSSIA Part 1. Moisture transfer and deformability

G.V. Kornienko<sup>1</sup>, E.V. Dvirnaya<sup>1</sup>, O.V. Startsev<sup>1,2</sup>, A.S. Krotov<sup>2</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

<sup>2</sup>V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia; administration@iptpn.ysn.ru

**Abstract.** Studies of changes in the diffusion characteristics of glass and carbon fiber reinforced polymers in their initial state and after exposure for 6 years in 5 climatic zones of the Russian Federation have been conducted. The value of the coefficient of determination of the approximation by the Fick and Langmuir models for the weighing results obtained at the stages of drying and humidification is equal to 1.00. Using the non-destructive plate twist method during conditioning, diagrams of shear modulus change were obtained and then approximated using the similar models. The modeling results allowed to distinguish the influence of climatic zones on the properties of the materials.

**Keywords:** *fiber reinforced polymers, outdoor weathering, moisture diffusion, plasticization, shear modulus, Fick's law of diffusion, Langmuir adsorption model*

**For citation:** Kornienko G.V., Dvirnaya E.V., Startsev O.V., Krotov A.S. Changes in the properties of aviation PCM after 6 years of exposure in typical climatic zones of Russia. Part 1. Moisture transfer and deformability. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 75–93. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-75-93.

## Введение

Один из основных недостатков полимерных композиционных материалов (ПКМ) – чувствительность их свойств к различным внешним воздействиям. Несмотря на высокую прочность при эксплуатации под действием различных климатических факторов для ПКМ характерна нестабильность механических показателей [1, 2]. Поэтому в настоящее время актуальной задачей является разработка новых ПКМ и исследование изменения их свойств при климатическом старении [3–5].

Для того чтобы детально изучить вклад отдельных факторов, влияющих на свойства ПКМ, нередко прибегают к ускоренным климатическим испытаниям. Чаще всего такие испытания представляют собой выдержку образцов ПКМ в различных камерах, таких как камера соляного тумана, камера тепла и влаги и т. д. [6–10].

В работе [11] рассмотрено влияние выдерживания углепластиков на основе эпоксидного связующего под ультрафиолетовым облучением. Данное воздействие привело к окислению связующего, в результате чего произошло оголение волокон, отмечено также снижение прочности при изгибе на 15 %. Известно исследование влияние циклов ультрафиолетового облучения и увлажнения на свойства эпоксидной смолы, отвержденной с помощью ангидридного связующего и армированной различными модификациями ткани HEXCEL. В результате всего через 1000 ч старения наблюдалось снижение прочности при межслойном сдвиге на 2–7 % [12].

Приведенные методы позволяют изучить селективное влияние различных факторов. Однако одним из основных неотъемлемых способов оценки стабильности материалов является экспозиция в натуральных условиях. Такие испытания позволяют учитывать синергичность климатических факторов, а также изучить их влияние в реальных дозах и динамике [13, 14].

Например, после 10 лет экспозиции стеклопластика, изготовленного на основе бисфенола А со стирольным растворителем, в умеренном климате г. Цукубе (Япония) наблюдалось снижение прочности при сдвиге в плоскости листа на 67–77 % [15]. В работе [16] приведены результаты исследования стеклопластика при экспозиции в г. Лиссабоне (Португалия). За 12 мес. экспозиции прочность при изгибе стеклопластиков на основе винилэфира и полиэстера снизилась на 37 и 13 % соответственно.

Особый интерес при изучении старения ПКМ на климатических площадках вызывает сравнение влияния различных климатических зон на свойства материала. Такие исследования позволяют рассмотреть совместное влияние основных климатических факторов в разном соотношении, а также сделать выводы об относительной агрессивности той или иной зоны экспозиции [17, 18].

Например, проведены исследования [19] влияния климатического старения углепластика ВКУ-51 и стеклопластика ВПС-58 после экспозиции в умеренном климате г. Москвы и теплом влажном климате г. Геленджика. Модуль при поперечном изгибе углепластика снизился на 17,5 и 23,8 % для образцов после экспозиции сроком 5 лет в г. Москве и г. Геленджике соответственно. Предел прочности при растяжении стеклопластика после 5 лет экспозиции в г. Геленджике снизился на 16,6 %, в то время как экспозиция в г. Москве практически не повлияла на данную характеристику [19].

Проведены испытания полистирола в шести климатических зонах вдоль прибрежной линии от КНР до Нидерландов [20]. Температура стеклования снижалась в 1,5 раза активнее для районов с более теплым и влажным климатом, чем для других климатических зон, несмотря на близкие значения суммарной солнечной радиации. Наибольшая деградация свойств наблюдалась для образцов полистирола после экспозиции в г. Саныша (КНР) с тропическим приморским климатом [20].

Как видно из приведенных примеров, одним из основных факторов, оказывающих значительное влияние на снижение характеристик ПКМ при экспозиции, является влага, накапливающаяся в материале при выпадении осадков и повышенной влажности. Повышенное влагосодержание может вызывать как необратимые изменения свойств, вызванные гидролизом и дальнейшей деструкцией полимерного материала, так и обратимые изменения, обусловленные пластификацией [7, 21–25], причем при климатическом старении структура материала деградирует, что чаще всего приводит к изменению диффузионных характеристик [26–29].

Например, в исследовании [29] показано увеличение значений коэффициента диффузии влаги при увлажнении образцов из стеклопластика после экспонирования в различных климатических зонах. При этом наибольший рост данного показателя (в ~3 раза) наблюдался для материалов, прошедших в течение трех лет экспозицию в тропическом климате г. Нячанге (Вьетнам).

В работе [30] приведены исследования изменения пластифицирующего действия влаги на свойства эпоксидных полимеров при экспозиции в г. Геленджике. Отмечается, что изменение диффузионных характеристик при сушке образцов до и после экспозиции сроком 3, 6, 9 и 12 мес. связано в том числе с сезонным изменением влагосодержания. При этом разница между температурами стеклования в высушенном и увлажненном состоянии для большинства материалов увеличивается в ходе экспозиции. Для эпоксидного полимера, изготовленного с добавкой пластификатора Этал-1 (10 %), эта разница в исходном состоянии и после 12 мес. экспозиции составила 5 и 25 °С соответственно [30].

Таким образом, отдельный интерес вызывают не только исследования изменения диффузионных характеристик ПКМ при климатическом старении, но и изучение изменения пластифицирующего эффекта влаги на свойства этих материалов. Одна из наиболее подходящих характеристик для изучения пластифицирующего действия влаги – модуль сдвига в плоскости листа ( $G$ ), определяемый методом кручения квадратной пластины. В работах [31, 32] рассмотрены основные преимущества этого метода и приведены примеры моделирования изменения данного показателя в зависимости от времени и влагосодержания.

Цель данной работы – изучение диффузионных характеристик различных ПКМ, прошедших длительную экспозицию в разных климатических зонах, а также определение изменения пластифицирующего действия влаги на различные свойства материалов, включая модуль сдвига в плоскости листа, до и после старения.

### Материалы и методы

Для испытаний выбраны стеклопластик ВПС-48/7781/7781 и углепластик ВКУ-39, изготовленные на основе связующего ВСЭ-1212 [33], а также исследовали углепластик КМКУ-3м [34]. Плиты из стеклопластика и углепластика размером 300×300 мм выставляли на экспозицию в пяти разных климатических зонах, где они находились на экспозиции в течение шести лет (табл. 1). Среднегодовые значения основных метеопараметров для данных климатических зон представлены в работе [35]. После экспозиции из каждой плиты вырезали квадратные образцы размером 70×70 мм, которым присваивалось обозначение в соответствии с табл. 1.

**Климатические зоны, в которых проходила натурная экспозиция образцов полимерных композиционных материалов**

Зона экспозиции	Обозначение климатической зоны	Материалы, прошедшие экспозицию в данной зоне
Исходное состояние		ВПС-48/7781
		КМКУ-3м
		ВКУ-39
г. Геленджик	ЮКС	ВПС-48/7781
		КМКУ-3м
		ВКУ-39
г. Дальние Зеленцы	СКС	ВПС-48/7781
		КМКУ-3м
г. Владивосток	ДВКС	ВПС-48/7781
		КМКУ-3м
		ВКУ-39
г. Москва	МКС	ВПС-48/7781
		КМКУ-3м
г. Звенигород	ЗКС	ВПС-48/7781
		КМКУ-3м
		ВКУ-39

Полученные образцы трех ПКМ после экспозиции в разных климатических зонах высушивали до постоянной массы в течение 106 сут над прокаленным силикагелем при температуре 60 °С. Затем образцы кондиционировали при той же температуре и относительной влажности воздуха 95±5 % в течение 76 сут [36, 37]. На каждой стадии кондиционирования регулярно измеряли массу образцов на аналитических весах с точностью до 10 мкг. По изменению массы рассчитывали величину относительного влагосодержания:

$$w = \frac{m(t) - m(0)}{m(0)} \cdot 100 \%,$$

где  $m(t)$  – масса образца в момент времени  $t$ , г;  $m(0)$  – масса материала в последний день этапа сушки, г.

Параллельно с определением массы измеряли модуль сдвига в плоскости листа ( $G$ ) с помощью метода кручения в соответствии со стандартом ГОСТ 33843–2016 [31, 32]. Для этого образец устанавливали на нижней опоре испытательной машины по одной оси и прикладывали усилие с помощью верхней опоры на перпендикулярную ось, создавая кручение квадратного образца (рис. 1). Каждый образец испытывали по двум осям, осуществляя при этом кручение образца в две разные стороны относительно одной оси.

На начальном участке нагружения кривой деформации определяли значение показателя  $G$  по значениям нагрузок  $F_1$  и  $F_2$  и соответствующим им деформациям  $\delta_1$  и  $\delta_2$  в соответствии с формулой

$$G = \frac{0,75\Delta L' L'' K}{1000h^3} \quad \text{при } \Delta = \frac{F_2 - F_1}{\delta_2 - \delta_1},$$

где  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – величины деформаций, мм ( $\delta_1 = 0,1h$ ,  $\delta_2 = 0,3h$ );  $F_1$ ,  $F_2$  – соответствующие нагрузки, Н;  $L'$ ,  $L''$  – средняя ширина образца в каждом направлении, мм;  $h$  – средняя толщина образца, мм;  $K = 0,82$  – геометрический поправочный коэффициент.

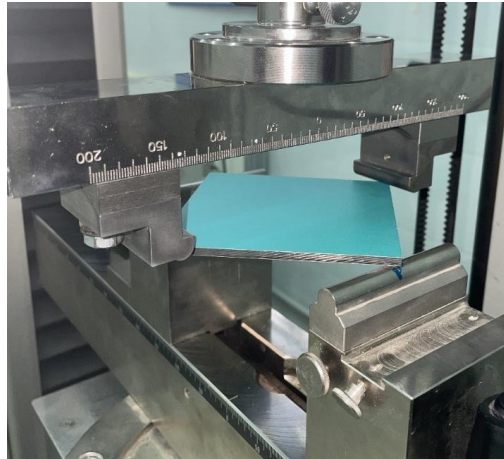


Рис. 1. Образец полимерного композиционного материала в условиях нагружения во время испытаний на кручение

Для каждого образца находили среднее из двух значений  $G$  по каждой оси, после чего рассчитывали относительное изменение модуля сдвига  $\Delta G(t)$  по формуле

$$\Delta G(t) = \frac{G(t) - G(0)}{G(0)} \cdot 100 \%,$$

где  $G(t)$  – модуль сдвига образца в момент времени  $t$ , ГПа;  $G(0)$  – модуль сдвига образца в последний день этапа сушки, ГПа.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

Диаграммы изменения массы образцов ПКМ аппроксимированы с помощью одномерных моделей Фика и Ленгмюра (верхние индексы  $f$  и  $l$  в формулах соответствуют моделям Фика и Ленгмюра) [38, 39]:

$$w^f(t) = w_0^f (1 - 8SUM_r);$$

$$SUM_r = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\exp[-n_r^2 d_r t]}{n_r^2}; \quad (1)$$

$$d_r = D_w / r^2; n_r = \pi(2r + 1); \frac{1}{r^2} = \frac{1}{L'^2} + \frac{1}{L''^2} + \frac{1}{h^2};$$

$$w^l(t) = \frac{\beta}{\gamma + \beta} w^f(t) + w_0^l \left( 1 - \frac{\gamma}{\gamma + \beta} \exp[-\beta t] - \frac{\beta}{\gamma + \beta} \right), \quad (2)$$

где  $w$  – относительное влагосодержание, %;  $t$  – время кондиционирования, сут;  $D_w$  – коэффициент диффузии влаги, мм<sup>2</sup>/сут;  $w_0$  – предельное относительное влагосодержание, %;  $\beta$  – значение вероятности превращения связанной воды в мобильную;  $\gamma$  – значение вероятности превращения мобильной воды в связанную.

Результаты применения данных моделей для образцов из стеклопластика ВПС-48/7781, углепластиков ВКУ-39 и КМКУ-3м в исходном состоянии и после экспозиции в климатической зоне ЮКС представлены на рис. 2.

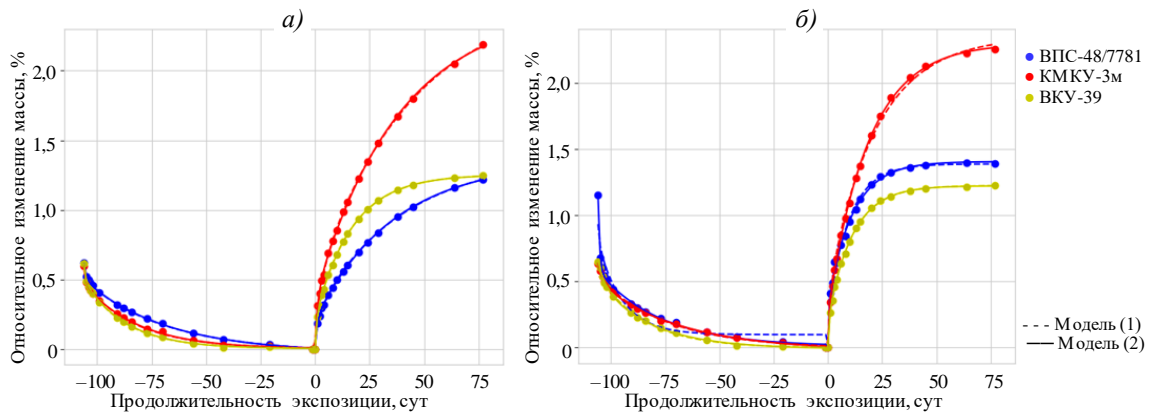


Рис. 2. Кинетика изменения массы образцов из полимерных композиционных материалов в исходном состоянии (а) и после предварительной экспозиции в течение 6 лет в климатической зоне ЮКС (б)

Видно, что результаты изменения массы всех образцов хорошо аппроксимируются моделями (1) и (2). Несмотря на схожую кинетику сушки материалов, на этапе увлажнения (как в исходном состоянии, так и после экспозиции) образцы из углепластика КМКУ-3м демонстрируют заметно бóльшую склонность к набору массы, чем углепластик и стеклопластик на основе связующего ВСЭ-1212. В свою очередь в исходном состоянии углепластик ВКУ-39 демонстрирует более высокую скорость диффузии на ранних этапах, чем стеклопластик ВПС-48/7781. Однако для образцов этих же материалов после экспозиции наблюдается обратная тенденция.

Для более детального изучения вклада различных климатических зон проведен анализ изменения влагосодержания в образцах отдельных ПКМ с разной предварительной обработкой (рис. 3).

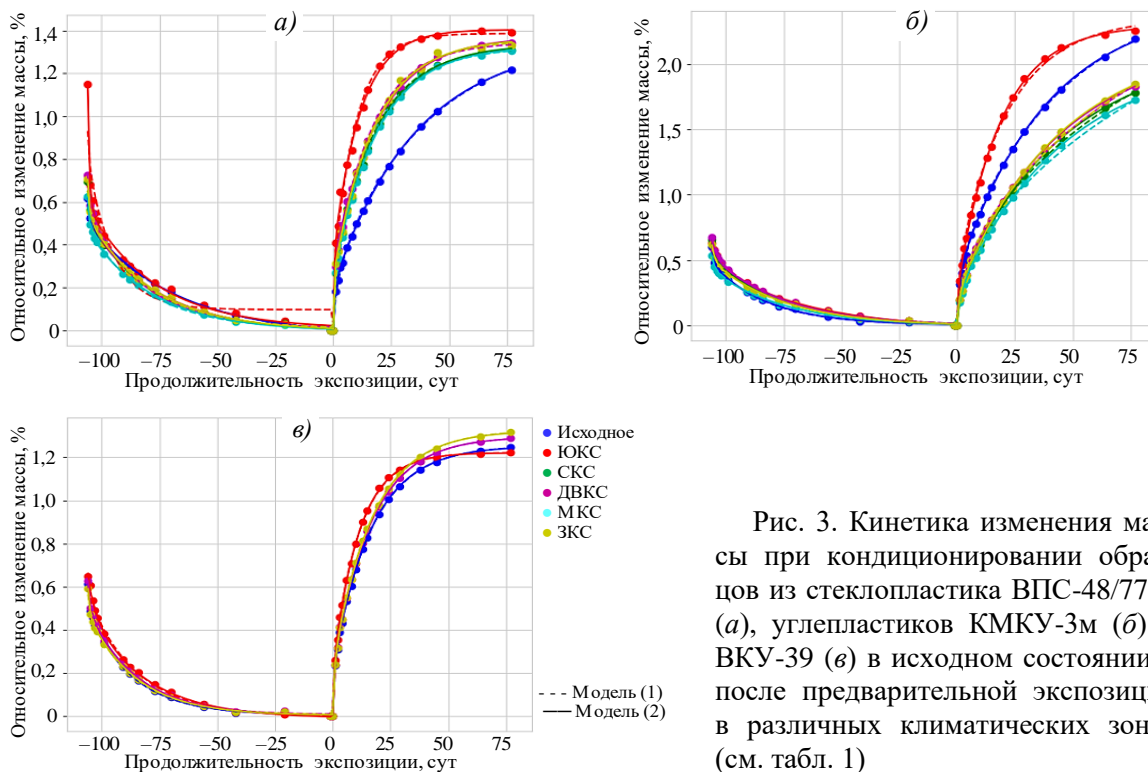


Рис. 3. Кинетика изменения массы при кондиционировании образцов из стеклопластика ВПС-48/7781 (а), углепластиков КМКУ-3м (б) и ВКУ-39 (в) в исходном состоянии и после предварительной экспозиции в различных климатических зонах (см. табл. 1)

Результаты обработки с помощью моделей (1) и (2) зависимостей  $w(t)$ , полученных при сушке и увлажнении, для образцов ПКМ представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты моделирования гравиметрических данных для образцов из стеклопластика ВПС-48/7781, углепластиков КМКУ-3м и ВКУ-39 в исходном состоянии и после экспозиции в различных климатических зонах с помощью моделей (1) и (2)**

Зона экспозиции (см. табл. 1)	Материал	Модель Фика (1)					Модель Ленгмюра (2)				
		$R^2$	Сушка		Увлажнение		$R^2$	Сушка		Увлажнение	
			$w_0^f$ , %	$D_w^f$ , мм <sup>2</sup> /сут	$w_0^f$ , %	$D_w^f$ , мм <sup>2</sup> /сут		$w_0^l$ , %	$D_w^l$ , мм <sup>2</sup> /сут	$w_0^l$ , %	$D_w^l$ , мм <sup>2</sup> /сут
Исходное состояние	ВПС-48/7781	0,999	-0,63	0,011	1,38	0,010	1,000	-0,65	0,28	1,35	0,37
	КМКУ-3м	0,999	-0,58	0,017	2,54	0,009	1,000	-0,60	0,45	2,45	0,30
	ВКУ-39	0,999	-0,60	0,021	1,25	0,023	1,000	-0,61	0,55	1,25	0,53
ЮКС	ВПС-48/7781	0,980	-0,85	0,035	1,39	0,041	0,999	-1,15	0,49	1,40	0,90
	КМКУ-3м	0,999	-0,66	0,012	2,35	0,018	1,000	-0,67	0,10	2,30	0,68
	ВКУ-39	0,999	-0,68	0,019	1,22	0,035	1,000	-0,68	0,11	1,22	0,58
СКС	ВПС-48/7781	0,997	-0,66	0,016	1,32	0,023	0,999	-0,70	0,25	1,34	0,53
	КМКУ-3м	0,998	-0,64	0,014	2,53	0,005	1,000	-0,67	0,21	2,12	0,23
ДВКС	ВПС-48/7781	0,996	-0,68	0,017	1,34	0,024	0,999	-0,74	0,22	1,37	0,53
	КМКУ-3м	0,998	-0,66	0,014	2,58	0,005	1,000	-0,69	0,21	2,18	0,20
	ВКУ-39	0,999	-0,60	0,020	1,30	0,024	1,000	-0,63	0,51	1,30	0,46
МКС	ВПС-48/7781	0,998	-0,59	0,016	1,32	0,022	0,999	-0,63	0,36	1,33	0,72
	КМКУ-3м	0,997	-0,53	0,013	2,69	0,004	1,000	-0,54	0,26	2,07	0,24
ЗКС	ВПС-48/7781	0,996	-0,66	0,016	1,35	0,023	0,999	-0,71	0,42	1,36	1,57
	КМКУ-3м	0,998	-0,61	0,013	2,73	0,005	1,000	-0,63	0,26	2,19	0,27
	ВКУ-39	0,999	-0,57	0,020	1,33	0,023	1,000	-0,59	0,58	1,32	0,48

В первую очередь важно отметить высокие значения коэффициента достоверности аппроксимации ( $R^2$ ) для обеих моделей. В случае модели (1) среднее значение  $R^2$  составляет 0,997, а в случае модели (2): 1,000.

На стадии предварительной сушки образцы одного материала из разных климатических зон ведут себя схожим образом. Можно отметить, что наибольшая потеря влаги прогнозируется для образцов после экспозиции в климатической зоне ЮКС, что связано с более высоким влагосодержанием образцов в нативном состоянии после экспозиции во влажном климате.

На стадии увлажнения можно заметить, что более высокие значения  $w_0^f$  и  $w_0^l$  и более низкое значение  $D_w^f$  наблюдаются для образцов углепластика КМКУ-3м в сравнении со значениями для углепластика и стеклопластика, изготовленных на основе

связующего ВСЭ-1212. Это явление показывает чувствительность данных показателей к составу ПКМ.

Согласно результатам обеих моделей, наибольшее значение коэффициента диффузии на стадии увлажнения для всех материалов наблюдается для образцов, прошедших экспозицию в климатической зоне ЮКС. На рис. 3 видно, как для некоторых материалов графики изменения массы образцов, прошедших экспозицию в климатической зоне ЮКС, заметно отделяются от общего пучка. Данное явление можно объяснить наибольшей агрессивностью атмосферы в теплом и влажном климате г. Геленджика [19]. Термовлажностное старение, а также высокие дозы солнечной радиации приводят к наибольшей деградации материала, которая сказывается в том числе и на способности материала сопротивляться влагонасыщению [30, 35]. Таким образом, среди образцов, прошедших экспозицию, наименьшие значения  $D_w^f$  наблюдаются для образцов из г. Москвы и г. Звенигорода с наиболее мягкими условиями в сравнении с остальными климатическими зонами.

В случае стеклопластика ВПС-48/7781 эффект экспозиции (независимо от климатической зоны) приводит к росту значения коэффициента диффузии на стадии увлажнения, однако для углепластика КМКУ-3м (за исключением образцов после экспозиции в климатической зоне ЮКС) этот показатель снижается после старения. Данный феномен можно объяснить протеканием доотверждения и другими процессами, которые способны вызывать улучшение свойств материала на ранних этапах старения [40]. Факт того, что образцы КМКУ-3м, прошедшие экспозицию в наиболее жестких условиях климатической зоны ЮКС, сорбируют влагу активнее, подтверждает данную теорию.

При сравнении изменения свойств стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика ВКУ-39, изготовленных на одном связующем ВСЭ-1212, можно заметить, что, несмотря на заметно бóльшие значения коэффициента диффузии для углепластика ВКУ-39 в исходном состоянии, данный материал демонстрирует более высокую устойчивость к старению. Таким образом, если для образцов стеклопластика ВПС-48/7781 после экспозиции значения  $D_w^f$  в среднем увеличились на 193 %, то для углепластика ВКУ-39 данная характеристика возросла всего на 19 %, а без учета образцов, прошедших экспозицию в климатической зоне ЮКС, значения  $D_w^f$  для углепластика ВКУ-39 до и после экспозиции колеблются в пределах погрешности (2 %).

В случае стеклопластика ВПС-48/7781 наивысшее значение предельного влагонасыщения на стадии увлажнения имеют образцы, прошедшие экспозицию в климатической зоне ЮКС. Это явление может быть связано с наибольшей поврежденностью данного материала, что приводит к бóльшему количеству пустот. В случае образцов из углепластика разница в значениях предельного влагосодержания для образцов в исходном состоянии и после старения не такая выраженная, что указывает на более высокую устойчивость к старению по сравнению со стеклопластиком. Однако следует отметить, что наибольшие значения параметра  $w_0^f$  наблюдаются для всех ПКМ после старения в климатической зоне ЮКС, а наименьшие – после экспозиции в климатической зоне МКС.

Как отмечалось ранее, помимо измерения массы образцов, в ходе эксперимента также регулярно измеряли модуль сдвига  $G$  в качестве характеристики механического состояния материалов. Значения модуля сдвига в плоскости листа для образцов в нативном, высушенном и увлажненном состояниях представлены на рис. 4.

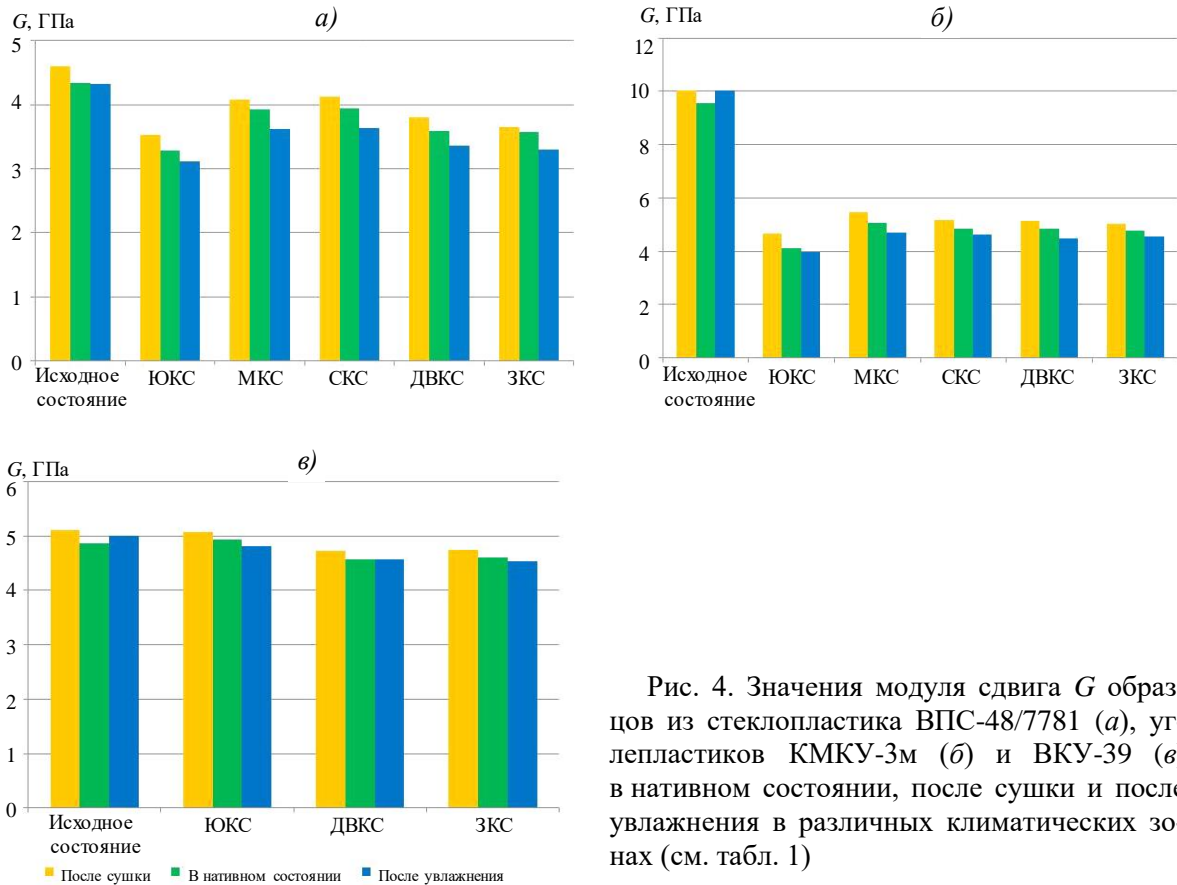


Рис. 4. Значения модуля сдвига  $G$  образцов из стеклопластика ВПС-48/7781 (а), углепластиков КМКУ-3м (б) и ВКУ-39 (в) в нативном состоянии, после сушки и после увлажнения в различных климатических зонах (см. табл. 1)

Видно, что сушка образцов, приводящая к удалению влаги, выступающей в роли пластификатора, обеспечивает рост показателя  $G$  для всех образцов, а увлажнение закономерно приводит к снижению значений  $G$ . Однако в случае образцов в исходном состоянии при увлажнении наблюдается увеличение данного показателя, что может быть связано с более высокой устойчивостью к пластификации образцов, не подвергшихся старению, а также с процессом доотверждения, инициируемым повышенной температурой и влагой [41].

В случае полимерных композитов ВПС-48/7781 и КМКУ-3м наблюдается заметное снижение модуля сдвига после экспозиции во всех зонах. При этом данный эффект отражается во всех трех состояниях. Наиболее выраженное снижение свойств относительно этих двух материалов в исходном состоянии наблюдается для образцов после экспозиции в климатической зоне ЮКС. В случае углепластика ВКУ-39 наименьшие значения параметра  $G$  наблюдаются для образцов после экспозиции в климатической зоне ДВКС. В то же время для этого углепластика после экспозиции в климатической зоне ЮКС наблюдается наибольшее снижение показателя  $G$  при увлажнении.

Для более детального изучения зависимости изменения модуля сдвига от продолжительности экспозиции построены кинетические диаграммы  $\Delta G(t)$  для разных материалов, которые представлены на рис. 5.

В случае образцов, прошедших экспозицию в климатической зоне ЮКС, наблюдается зеркальная зависимость относительно изменения влагосодержания (рис. 2, а). Таким образом, при наибольшем влагонасыщении для образцов углепластика КМКУ-3м происходит наибольшее снижение параметра  $\Delta G$ , меньше – для стеклопластика

ВПС-48/7781, а наименее выраженное снижение значений  $\Delta G$  при наименьшем возрастании массы – для образцов углепластика ВКУ-39. В случае образцов в исходном состоянии (особенно для углепластиков) на этапе увлажнения после снижения значения  $\Delta G$  происходит возрастание данного показателя, что также может быть связано с процессами доотверждения. Таким образом, при сопоставлении зависимостей  $\Delta m(t)$  и  $\Delta G(t)$  для материалов в исходном состоянии (рис. 2, а и рис. 5, а) можно заметить обратную зависимость: при наибольшем влагопоглощении образцов углепластика КМКУ-3м наблюдается наименьшее снижение параметра  $\Delta G$ , что демонстрирует наибольшую устойчивость данного материала к пластифицирующему действию влаги.

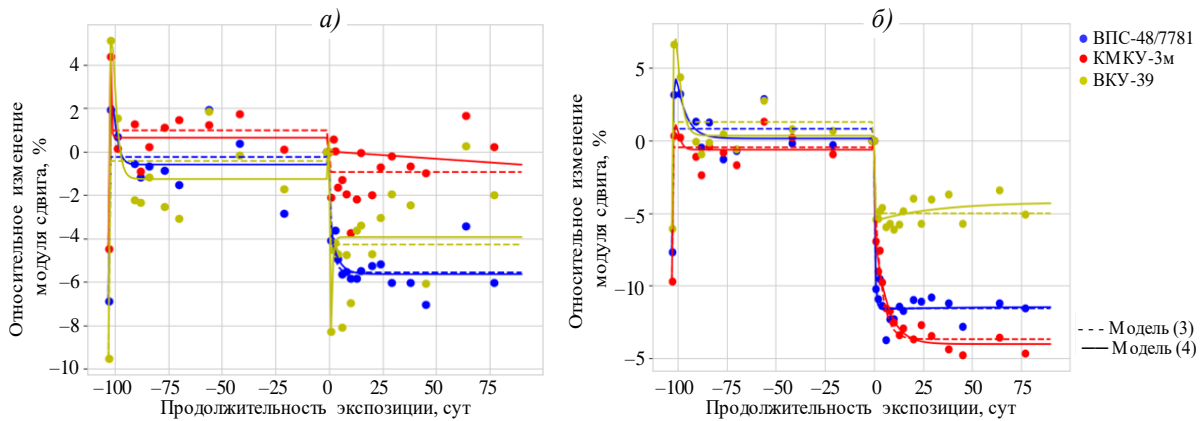


Рис. 5. Кинетика изменения модуля сдвига образцов из полимерных композиционных материалов в исходном состоянии (а) и после предварительной экспозиции в течение 6 лет в климатической зоне ЮКС (б)

Фронт влаги, поглощаемой материалом при увлажнении в соответствии с моделями (1) и (2), является также фронтом изменения ее пластифицирующего действия. Исходя из этой теории, изменение параметра  $\Delta G$  должно происходить по тем же законам, что и показателя  $\Delta m$ :

$$\begin{aligned} \Delta G^f(t) &= \Delta G_0^f (1 - 8SUM_r); \\ SUM_r &= \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\exp[-n_r^2 d_r t]}{n_r^2}; \\ d_r &= D_g / r^2; n_r = (2r + 1); \frac{1}{r^2} = \frac{1}{L^2} + \frac{1}{L'^2} + \frac{1}{h^2}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta G^l(t) = \frac{\beta}{\gamma + \beta} \Delta G^f(t) + \Delta G_0^l \left( 1 - \frac{\gamma}{\gamma + \beta} \exp[-\beta t] - \frac{\beta}{\gamma + \beta} \right), \quad (4)$$

где  $\Delta G_0$  – предельное значение параметра  $\Delta G$ , %;  $D_g$  – скорость изменения параметра  $\Delta G$ , сут<sup>-1</sup> (верхние индексы  $f$  и  $l$  соответствуют моделям (3) и (4)).

На рис. 6 представлены диаграммы параметра  $\Delta G(t)$ , аппроксимированные с помощью моделей (3) и (4), для образцов из разных климатических зон, сгруппированных по материалам. В табл. 3 приведены значения параметров, полученных в результате применения моделей (3) и (4) (аналогично табл. 2).

Среднее значение коэффициентов достоверности аппроксимации данных, полученных на обеих стадиях кондиционирования, составило 0,85 для модели (3) и 0,91 для модели (4). Для всех образцов (рис. 6) на начальном этапе сушки после резкого возрастания значений  $\Delta G$  наблюдается постепенное снижение данного показателя до определенного уровня, на котором значение  $\Delta G$  сохраняется до этапа увлажнения. Образующийся в результате пик, хорошо описывается моделью (4), в отличие от модели (3), описывающей монотонный рост или снижение показателя, что и приводит к возрастанию параметра  $R^2$  при усложнении аналога модели Фика (3) до аналога модели Ленгмюра (4). На начальном этапе увлажнения для образцов углепластика ВКУ-39 (рис. 6, в) наблюдается аналогичный пик, что также сказывается на заметном снижении параметра  $R^2$  при использовании модели (3). При переходе к модели (4) для данного углепластика также наблюдается заметное возрастание коэффициента  $R^2$ .

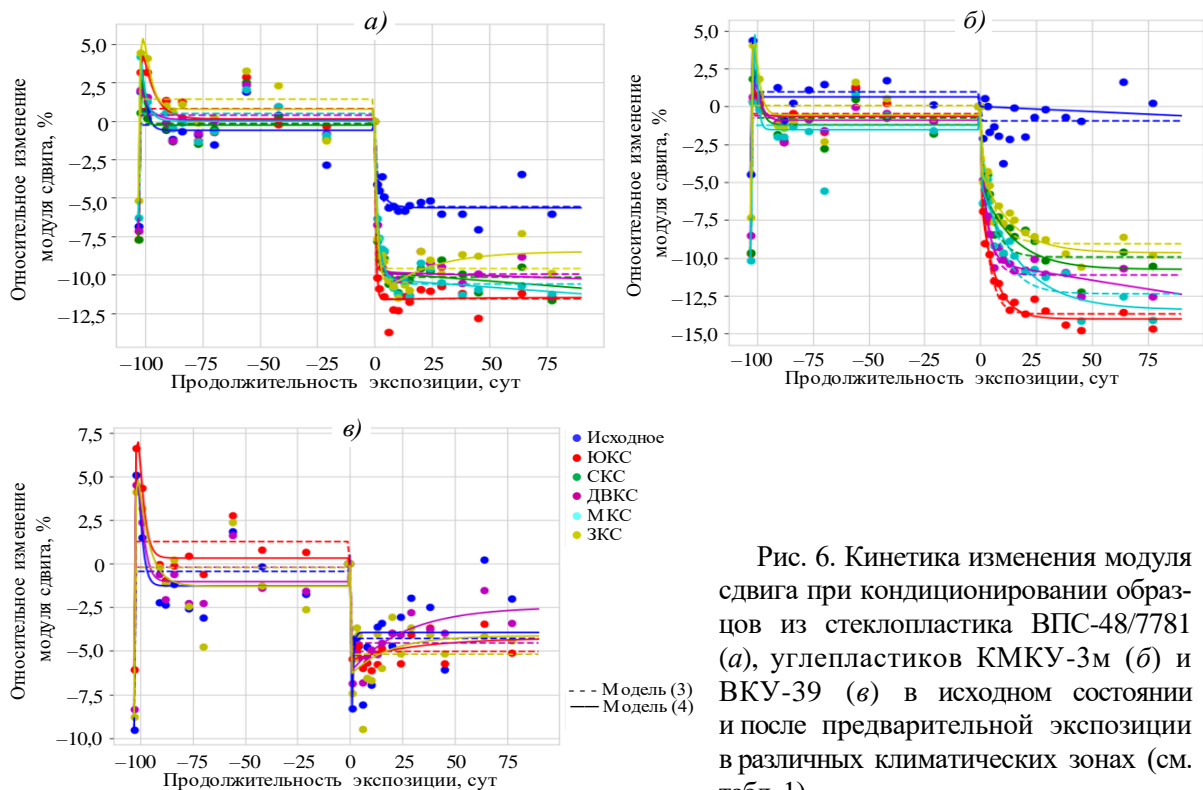


Рис. 6. Кинетика изменения модуля сдвига при кондиционировании образцов из стеклопластика ВПС-48/7781 (а), углепластиков КМКУ-3м (б) и ВКУ-39 (в) в исходном состоянии и после предварительной экспозиции в различных климатических зонах (см. табл. 1)

Описанное возрастание показателя  $\Delta G$ , которое может происходить в результате протекания процессов доотверждения, также приводит к заметному снижению значений  $R^2$  для образцов в исходном состоянии. Таким образом, среднее значение коэффициента  $R^2$ , посчитанное только для образцов после экспозиции, при использовании моделей (3) и (4) составляет 0,89 и 0,95 соответственно, а среднее значение  $R^2$  только для образцов стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика КМКУ-3м после экспозиции составляет 0,95 и 0,97.

Скорость изменения показателя  $\Delta G$  выражается показателем  $D_g$  (аналогом коэффициента диффузии). В соответствии с результатами расчета по модели (3), параметр  $D_g^f$  на этапе сушки увеличивается после экспозиции для всех материалов, а при увлажнении среди экспонированных образцов стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика КМКУ-3м наибольшие значения  $D_g^f$  достигаются для образцов, прошедших экспозицию в климатической зоне ЮКС. Следует отметить, что в сравнении с остальными ПКМ для образцов ВКУ-39 наблюдается наибольшее значение  $D_g^f$  на стадии увлажнения.

Результаты моделирования данных изменения модуля сдвига для образцов из стеклопластика ВПС-48/7781, углепластиков КМКУ-3м и ВКУ-39 в исходном состоянии и после экспозиции в различных климатических зонах с помощью моделей (3) и (4)

Зона экспозиции (см. табл. 1)	Материал	Аналог модели Фика (3)					Аналог модели Ленгмюра (4)				
		$R^2$	Сушка		Увлажнение		$R^2$	Сушка		Увлажнение	
			$\Delta G_0^f$ , %	$D_g^f$ , мм <sup>2</sup> /сут	$\Delta G_0^f$ , %	$D_w^f$ , мм <sup>2</sup> /сут		$\Delta G_0^l$ , %	$D_g^l$ , мм <sup>2</sup> /сут	$\Delta G_0^l$ , %	$D_g^l$ , мм <sup>2</sup> /сут
Исходное состояние	ВПС-48/7781	0,86	6,77	11,08	-5,57	0,25	0,90	6,91	0,38	-5,65	4,60
	КМКУ-3м	0,48	5,59	10,50	-0,95	7,96	0,54	0,05	1,40	53,18	0,00
	ВКУ-39	0,52	9,30	13,05	-4,29	14,39	0,72	9,39	0,38	-3,95	0,58
ЮКС	ВПС-48/7781	0,96	8,69	16,48	-11,57	0,70	0,98	8,17	0,62	-11,48	0,67
	КМКУ-3м	0,98	9,44	10,75	-13,70	0,11	0,99	9,69	0,40	-14,04	1,34
	ВКУ-39	0,81	7,52	14,91	-5,03	19,59	0,95	7,36	0,32	-4,25	1,66
СКС	ВПС-48/7781	0,97	7,73	12,23	-10,16	0,41	0,97	0,13	0,57	-94,27	0,48
	КМКУ-3м	0,91	9,09	10,94	-9,95	0,08	0,95	9,22	0,36	-10,76	4,84
ДВКС	ВПС-48/7781	0,97	7,68	18,13	-9,96	0,34	0,97	7,44	7,01	-16,32	0,36
	КМКУ-3м	0,97	8,11	18,29	-11,13	0,11	0,98	8,23	0,34	-28,69	0,14
	ВКУ-39	0,68	8,34	13,05	-4,55	9,05	0,91	8,56	0,27	-2,47	6,10
МКС	ВПС-48/7781	0,96	6,93	15,45	-10,61	0,20	0,98	6,55	14,06	-100,0	0,23
	КМКУ-3м	0,91	9,15	20,20	-12,37	0,05	0,94	0,41	0,48	-13,44	6,35
ЗКС	ВПС-48/7781	0,94	6,74	15,19	-9,60	0,51	0,97	6,61	0,28	-8,48	0,24
	КМКУ-3м	0,90	7,56	15,40	-9,07	0,07	0,96	7,60	0,36	-9,66	4,65
	ВКУ-39	0,64	8,76	13,75	-5,19	25,04	0,79	7,89	0,70	-4,13	15,21

Другим параметром, демонстрирующим чувствительность к влиянию экспозиции в различных климатических зонах на склонность к пластификации материалов при увлажнении, является  $\Delta G_0$ . На стадии сушки за некоторым исключением наблюдаются схожие значения данного показателя для всех образцов, что свидетельствует об одинаковом содержании влаги независимо от исследуемого материала и зоны экспозиции. Сравнение значений  $\Delta G_0$  на стадии увлажнения для образцов полимерных композитов ВПС-48/7781, КМКУ-3м и ВКУ-39 в исходном состоянии и после экспозиции в различных климатических зонах представлено на рис. 7.

Видно, что в исходном состоянии наименьшее максимальное изменение модуля сдвига в соответствии с моделью (3) наблюдается для образцов углепластика КМКУ-3м, а в соответствии с прогнозом модели (4) на стадии увлажнения для данных образцов происходит активное возрастание значений модуля сдвига. Данное явление показывает, что, несмотря на наиболее активный набор массы при увлажнении и максимальное значение  $w_0$ , в исходном состоянии данный материал демонстрирует наибольшую устойчивость к пластифицирующему действию влаги. В то же время

экспозиция приводит к неизбежному снижению показателя  $\Delta G_0$ . В соответствии с результатами моделей (3) и (4) для экспонированных образцов материал ВКУ-39 демонстрирует наименьшие значения  $|\Delta G_0|$ .

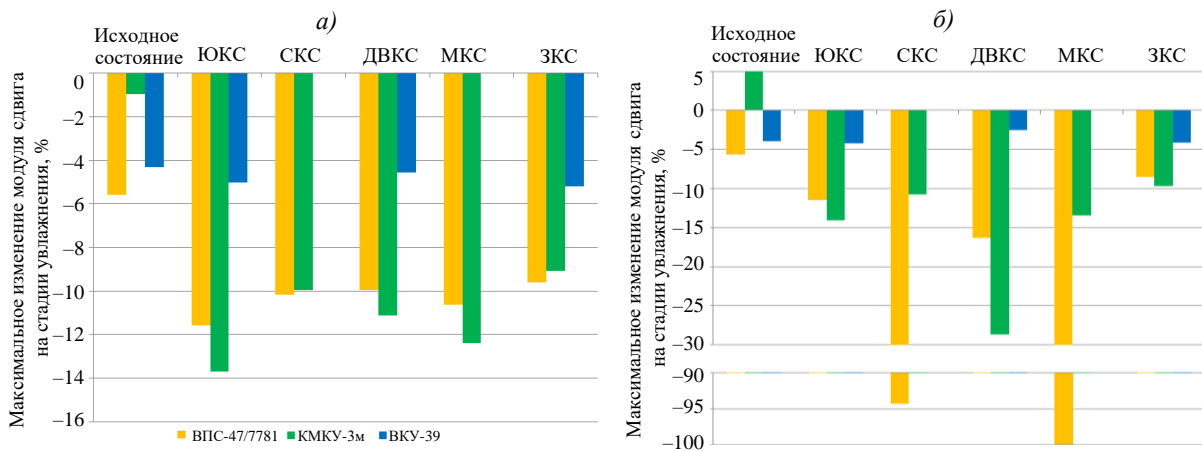


Рис. 7. Максимальное значение изменения модуля сдвига ( $\Delta G_0$ ) на стадии влагонасыщения в соответствии с моделями (3) (а) и (4) (б)

В случае применения модели (3) для образцов стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика КМКУ-3м наибольшие значения  $|\Delta G_0|$  достигаются для образцов, прошедших экспозицию в климатической зоне ЮКС, а в случае применения модели (4), за исключением явных выбросов (образцы стеклопластика ВПС-48/7781 после экспозиции в климатических зонах СКС и МКС), наибольшее значение  $|\Delta G_0|$  прогнозируется для образцов после экспозиции в климатических зонах ЮКС и ДВКС. Данное явление в очередной раз подтверждает влияние агрессивности приморской атмосферы на свойства ПКМ.

### Заключения

Проведены исследования ПКМ авиационного назначения ВПС-48/7781, КМКУ-3м и ВКУ-39 в исходном состоянии и после 6 лет экспозиции в разных климатических зонах РФ. Изучены процессы влагонасыщения образцов при предварительной сушке и дальнейшем увлажнении при температуре 60 °С.

Установлено, что результаты изменения влагосодержания  $w(t)$  хорошо описываются с помощью второго закона Фика (1) и модели Ленгмюра (2) – значение  $R^2$  составило 0,997 и 1,000 соответственно. В большинстве случаев длительная экспозиция приводила к увеличению значений коэффициента диффузии и максимальному влагосодержанию на стадии увлажнения. На большинство показателей наибольшее влияние оказала экспозиция в агрессивных условиях г. Геленджика, а наименьшее – в более мягких условиях г. Москвы.

Установлено, что наибольшую устойчивость к сохранению модуля сдвига в плоскости листа при экспозиции демонстрирует углепластик ВКУ-39, а для стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика КМКУ-3м наибольшее снижение значений модуля упругости в нативном, высушенном и увлажненном состояниях наблюдается для образцов, прошедших экспозицию в климатической зоне ЮКС.

Результаты изменения показателя  $\Delta G(t)$ , полученные с высокой точностью неразрушающим методом, аппроксимированы с помощью моделей-аналогов второго закона Фика (3) и модели Ленгмюра (4). Средние значения  $R^2$  данных моделей для всех

образцов составили 0,85 и 0,91 соответственно без учета диаграмм  $\Delta G(t)$ , на которых в конце стадии увлажнения наблюдается возрастание параметра  $G$ , связанное, по-видимому, с процессами доотверждения; параметр  $R^2$  увеличивается до 0,95 и 0,97 соответственно.

Результаты расчета по моделям (3) и (4) показали, что среди исходных материалов образцы углепластика КМКУ-3м, несмотря на наибольшую склонность к влагопоглощению, на стадии увлажнения демонстрируют наибольшую способность к сопротивлению пластификации. Наибольшая устойчивость к старению, выраженная наименьшим изменением показателя  $\Delta G_0$  относительно исходного состояния, наблюдается для углепластика ВКУ-39. Установлено также, что среди различных климатических зон, экспозиция в условиях агрессивной влажной среды на Геленджикской и Дальневосточной климатических станциях вносит наибольший вклад в склонность к пластификации материалов.

*Данная работа финансировалась за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00009.*

### Список источников

1. 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: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
2. 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). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. Raveendran P., Alagarsamy S.V., Chanakyan C. et al. A hybrid approach for prediction of machining performances of glass fiber reinforced plastic (Epoxy) composites // *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2021. Vol. 9. No. 3. Art. 035046.
4. Старцев В.О., Славин А.В. Стойкость углепластиков и стеклопластиков на основе расплавленных связующих к воздействию умеренно холодного и умеренно теплого климата // *Труды ВИАМ*. 2021. № 5 (99). С. 114–126. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
5. Гуляев И. Н., Зеленина И. В., Валева Е. О., Хасков М. А. Влияние климатического старения на свойства высокотемпературных углепластиков // *Труды ВИАМ*. 2021. № 2 (96). С. 39–51. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-39-51.
6. Chauhan V., Kärki T., Varis J. Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2022. Vol. 35. No. 8. P. 1169–1209.
7. Huang S., Yan L., Kasal B., Wei Y. Moisture diffusion and tensile properties of epoxy-based and polyurethane-based flax-glass hybrid FRP under hygrothermal and weathering environments // *Composites. Part B: Engineering*. 2023. Vol. 267. Art. 111049.
8. Xu B., van den Hurk B., Liu T. et al. Effect of UV-water weathering on the mechanical properties of flax-fiber-reinforced polymer composites // *Polymer Composites*. 2024. Vol. 45. No. 5. P. 4266–4280.
9. Sawpan M.A., Alshahrani H., Kafi A. Durability of pultruded GFRP rebar subjected to natural weathering in alkaline solution for 10 years // *Journal of Polymers and the Environment*. 2023. Vol. 31. No. 3. P. 1090–1101.

10. Namrata B., Pai Y., Nair V.G. et al. Analysis of aging effects on the mechanical and vibration properties of quasi-isotropic basalt fiber-reinforced polymer composites // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. No. 1. Art. 26730.
11. Kim J., Kang S., Seong I. et al. Advancing CFRP durability: Interfacial and weathering performance of epoxy and acrylic matrices // *Composites. Part B: Engineering*. 2025. Vol. 297. Art. 112315.
12. Semitekolos D., Konstantopoulos G., Trompeta A.F. et al. Mechanical Properties, Surface Assessment, and Structural Analysis of Functionalized CFRPs after Accelerated Weathering // *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 23. Art. 4092.
13. Nezafatkah S., Margoto O.H., Sassani F., Milani A.S. Understanding natural and accelerated weathering degradation mechanisms of glass and natural fiber composites: A review // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2025. Vol. 45. P. 1–23. DOI: 10.1177/07316844251337240.
14. Rohem Gualberto H., dos Reis J.M.L., Calixto de Andrade M. et al. Effect of outdoor environmental exposure on the mechanical behavior of steel/GFRP single-lap joints // *The Journal of Adhesion*. 2024. Vol. 100. No. 14. P. 1323–1346.
15. Nishizaki I., Sakuraba H., Tomiyama T. Durability of pultruded GFRP through ten-year outdoor exposure test // *Polymers*. 2015. Vol. 7. No. 12. P. 2494–2503.
16. Sousa J.M., Correia J.R., Cabral-Fonseca S. Durability of glass fibre reinforced polymer pultruded profiles: comparison between QUV accelerated exposure and natural weathering in a Mediterranean climate // *Experimental Techniques*. 2016. Vol. 40. No. 1. P. 207–219.
17. Srivabut C., Khamtree S., Homkhiew C. et al. Comparative effects of different coastal weathering on the thermal, physical, and mechanical properties of rubberwood–latex sludge flour reinforced with polypropylene hybrid composites // *Composites. Part C: Open Access*. 2023. Vol. 12. Art. 100383.
18. Rosa I.C., Castelo A., Sousa J.M. Natural Weathering of GFRP Structures: Case Studies, Data Survey, and Proposal of a Moisture Conversion Factor for Durability Design // *Journal of Composites for Construction*. 2024. Vol. 28. No. 6. Art. 04024063.
19. Евдокимов А.А., Петрова А.П., Павловский К.А., Гуляев И.Н. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксивинилэфирного связующего // *Труды ВИАМ*. 2021. № 3 (97). С. 128–136. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136.
20. Shi Y., Qin J., Tao Y. et al. Natural weathering severity of typical coastal environment on polystyrene: Experiment and modeling // *Polymer Testing*. 2019. Vol. 76. P. 138–145.
21. Starkova O., Aiello M.A., Aniskevich A. Long-term moisture diffusion in vinylester resin and CFRP rebars: A 20-year case study // *Composites Science and Technology*. 2023. Vol. 242. Art. 110167.
22. Osa-Uwagboe N., Silberschmidt V.V., Baxevanakis K.P., Demirci E. Effects of moisture absorption on penetration performance of FRP sandwich structures // *Composite Structures*. 2024. Vol. 344. Art. 118319.
23. Sugai M., Koyama M. Effect of moisture on interfacial and mechanical properties of GFRP containing particles of two sizes // *Results in Materials*. 2023. Vol. 17. Art. 100356.
24. Svetlik-Haley S., Karbhari V.M. Humidity and immersion based hygrothermal aging of pultruded GFRP composites: Moisture uptake and diffusion // *Journal of Composite Materials*. 2025. Vol. 59. No. 8. P. 991–1011.
25. Sun Y., Jin Z., Zhang X., Zhu D. Experimental and molecular dynamics study on the deterioration mechanism of GFRP bars in distilled water and salt solution environments // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 60. Art. 105224.
26. Wang P., Wu H.L., Leung C.K., Li W.W. Hygrothermal aging effects on the diffusion-degradation process of GFRP composite: Experimental study and numerical simulation // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 379. Art. 131075.
27. Wang P., Wu H.L., Leung C.K. Hygrothermal aging effect on the water diffusion in glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite: experimental study and numerical simulation // *Composites Science and Technology*. 2022. Vol. 230. Art. 109762.

28. da Silva G.A.S., d'Almeida J.R.M., Cardoso D.C.T. Investigation on moisture absorption behavior on GFRP and neat epoxy systems in hygrothermal salt fog aging // *Composites. Part B: Engineering*. 2024. Vol. 272. Art. 111214.
29. Старцева Л.Т., Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диффузия влаги в стеклопластики после их климатического старения // *Доклады академии наук*. 2014. Т. 456. № 3. С. 305–309.
30. Startsev V.O., Lebedev M.P., Khrulev K.A. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers // *Polymer testing*. 2018. Vol. 65. P. 281–296.
31. 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: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-161-178.
32. Лебедев М.П., Старцев О.В., Корниенко Г.В. Диффузионная модель упругих свойств полимерных композиционных материалов во влажной среде // *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2024. Vol. 519. No. 1. P. 25–31.
33. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.П., Гращенков Д.В. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // *Труды ВИАМ*. 2016. № 6 (42). С. 93–108. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-11-11.
34. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов // *Труды ВИАМ*. 2016. № 8 (44). С. 52–59. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
35. Велигодский И.М., Коваль Т.В., Курносоев А.О., Мараховский П.С. Исследование климатической стойкости образцов стеклопластика после натурной экспозиции в различных климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2022. № 11 (117). С. 134–148. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
36. Старцев В.О., Нечаев А.А. Влияние натуральных и ускоренных климатических испытаний на прочность наномодифицированного углепластика // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). С. 134–151. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-134-151.
37. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
38. Crank J. *The mathematics of diffusion*. Second edition. Oxford: Clarendon press, 1975. 414 p.
39. Carter H.G., Kibler K.G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins // *Open Journal of Composite Materials*. 1978. Vol. 12. P. 118–131.
40. Uzay C., Boztepe M.H., Bayramoğlu M., Geren N. Effect of post-curing heat treatment on mechanical properties of fiber reinforced polymer (FRP) composites // *Materials Testing*. 2017. Vol. 59. No. 4. P. 366–372.
41. Sambayi P.M.K., Heyns P.S. Effects of multiple post cure cycles on properties of composite carbon fibre and epoxy materials // *Journal of Composite Materials*. 2023. Vol. 57. No. 15. P. 2467–2481.

## References

1. 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: August 06, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
2. 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), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 06, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

3. Raveendran P., Alagarsamy S.V., Chanakyan C. et al. A hybrid approach for prediction of machining performances of glass fiber reinforced plastic (Epoxy) composites. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2021, vol. 9, no. 3, art. 035046.
4. Startsev V.O., Slavin A.V. Carbon and glass reinforced polymer based on solventfree binders resistance to the impact of a moderate cold and moderate warm climate. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), pp. 114–126. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
5. Gulyev I.N., Zelenina I.V., Valevin E.O., Khaskov M.A. Influence of climatic ageing on the properties of high-temperature carbon fiber reinforced plastics. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), pp. 39–51. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-39-51.
6. Chauhan V., Kärki T., Varis J. Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2022, vol. 35, no. 8, pp. 1169–1209.
7. Huang S., Yan L., Kasal B., Wei Y. Moisture diffusion and tensile properties of epoxy-based and polyurethane-based flax-glass hybrid FRP under hygrothermal and weathering environments. *Composites. Part B: Engineering*, 2023, vol. 267, art. 111049.
8. Xu B., van den Hurk B., Liu T. et al. Effect of UV-water weathering on the mechanical properties of flax-fiber-reinforced polymer composites. *Polymer Composites*, 2024, vol. 45, no. 5, pp. 4266–4280.
9. Sawpan M.A., Alshahrani H., Kafi A. Durability of pultruded GFRP rebar subjected to natural weathering in alkaline solution for 10 years. *Journal of Polymers and the Environment*, 2023, vol. 31, no. 3, pp. 1090–1101.
10. Namrata B., Pai Y., Nair V.G. et al. Analysis of aging effects on the mechanical and vibration properties of quasi-isotropic basalt fiber-reinforced polymer composites. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, art. 26730.
11. Kim J., Kang S., Seong I. et al. Advancing CFRP durability: Interfacial and weathering performance of epoxy and acrylic matrices. *Composites. Part B: Engineering*, 2025, vol. 297, art. 112315.
12. Semitekolos D., Konstantopoulos G., Trompeta A.F. et al. Mechanical Properties, Surface Assessment, and Structural Analysis of Functionalized CFRPs after Accelerated Weathering. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 23, art. 4092.
13. Nezafatkah S., Margoto O.H., Sassani F., Milani A.S. Understanding natural and accelerated weathering degradation mechanisms of glass and natural fiber composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2025, vol. 45, pp. 1–23. DOI: 10.1177/07316844251337240.
14. Rohem Gualberto H., dos Reis J.M.L., Calixto de Andrade M. et al. Effect of outdoor environmental exposure on the mechanical behavior of steel/GFRP single-lap joints. *The Journal of Adhesion*, 2024, vol. 100, no. 14, pp. 1323–1346.
15. Nishizaki I., Sakuraba H., Tomiyama T. Durability of pultruded GFRP through ten-year outdoor exposure test. *Polymers*, 2015, vol. 7, no. 12, pp. 2494–2503.
16. Sousa J.M., Correia J.R., Cabral-Fonseca S. Durability of glass fibre reinforced polymer pultruded profiles: comparison between QUV accelerated exposure and natural weathering in a Mediterranean climate. *Experimental Techniques*, 2016, vol. 40, no. 1, pp. 207–219.
17. Srivabut C., Khamtree S., Homkhiew C. et al. Comparative effects of different coastal weathering on the thermal, physical, and mechanical properties of rubberwood–latex sludge flour reinforced with polypropylene hybrid composites. *Composites. Part C: Open Access*, 2023, vol. 12, art. 100383.
18. Rosa I.C., Castelo A., Sousa J.M. Natural Weathering of GFRP Structures: Case Studies, Data Survey, and Proposal of a Moisture Conversion Factor for Durability Design. *Journal of Composites for Construction*, 2024, vol. 28, no. 6, art. 04024063.
19. Evdokimov A.A., Petrova A.P., Pavlovskiy K.A., Gulyaev I.N. The influence of climatic ageing on the properties of PCM-based epoxy resin systems. *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), pp. 128–136. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 08, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136.

20. Shi Y., Qin J., Tao Y. et al. Natural weathering severity of typical coastal environment on polystyrene: Experiment and modeling. *Polymer Testing*, 2019, vol. 76, pp. 138–145.
21. Starkova O., Aiello M.A., Aniskevich A. Long-term moisture diffusion in vinyl ester resin and CFRP rebars: A 20-year case study. *Composites Science and Technology*, 2023, vol. 242, art. 110167.
22. Osa-Uwagboe N., Silberschmidt V.V., Baxevanakis K.P., Demirci E. Effects of moisture absorption on penetration performance of FRP sandwich structures. *Composite Structures*, 2024, vol. 344, art. 118319.
23. Sugai M., Koyama M. Effect of moisture on interfacial and mechanical properties of GFRP containing particles of two sizes. *Results in Materials*, 2023, vol. 17, art. 100356.
24. Svetlik-Haley S., Karbhari V.M. Humidity and immersion based hygrothermal aging of pultruded GFRP composites: Moisture uptake and diffusion. *Journal of Composite Materials*, 2025, vol. 59, no. 8, pp. 991–1011.
25. Sun Y., Jin Z., Zhang X., Zhu D. Experimental and molecular dynamics study on the deterioration mechanism of GFRP bars in distilled water and salt solution environments. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 60, art. 105224.
26. Wang P., Wu H.L., Leung C.K., Li W.W. Hygrothermal aging effects on the diffusion-degradation process of GFRP composite: Experimental study and numerical simulation. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 379, art. 131075.
27. Wang P., Wu H.L., Leung C.K. Hygrothermal aging effect on the water diffusion in glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite: experimental study and numerical simulation. *Composites Science and Technology*, 2022, vol. 230, art. 109762.
28. da Silva G.A.S., d’Almeida J.R.M., Cardoso D.C.T. Investigation on moisture absorption behavior on GFRP and neat epoxy systems in hygrothermal salt fog aging. *Composites. Part B: Engineering*, 2024, vol. 272, art. 111214.
29. Startseva L.T., Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S. Diffusion of moisture in fiberglass after their climatic aging. *Doklady akademii nauk*, 2014, vol. 456, no. 3, pp. 305–309.
30. Startsev V.O., Lebedev M.P., Khrulev K.A. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers. *Polymer testing*, 2018, vol. 65, pp. 281–296.
31. 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: September 18, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-161-178.
32. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kornienko G.V. Diffusion model of elastic properties of polymer composite materials in a humid environment. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Khimiya, nauki o materialakh*, 2024, vol. 519, no. 1, pp. 25–31.
33. Nikolaev E.V., Barbotko S.L., Andreeva N.P., Pavlov M.R., Grashchenkov D.V. Complex research of influence of climatic and operational factors on new generation epoxy binding and polymeric composite materials on its basis. Part 4. Natural climatic tests of polymeric composite materials on the basis of epoxy matrix. *Trudy VIAM*, 2016, no. 6, pp. 93–108. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-11-11.
34. Kutsevich K.E., Dementeva L.A., Lukina N.F. Properties and application of polymer composite materials based on glue prepregs. *Trudy VIAM*, 2016, no. 8, pp. 52–59. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
35. Veligodskiy I.M., Koval T.V., Kurnosov A.O., Marakhovskiy P.S. Study of resistance of glass fiber reinforced plastic to natural weathering in different climatic conditions. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), pp. 134–148. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
36. 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), pp. 134–151. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-134-151.

37. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
38. Crank J. *The mathematics of diffusion. Second edition*. Oxford: Clarendon press, 1975, 414 p.
39. Carter H.G., Kibler K.G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins. *Open Journal of Composite Materials*, 1978, vol. 12, pp. 118–131.
40. Uzay C., Boztepe M.H., Bayramoğlu M., Geren N. Effect of post-curing heat treatment on mechanical properties of fiber reinforced polymer (FRP) composites. *Materials Testing*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 366–372.
41. Sambayi P.M.K., Heyns P.S. Effects of multiple post cure cycles on properties of composite carbon fibre and epoxy materials. *Journal of Composite Materials*, 2023, vol. 57, no. 15, pp. 2467–2481.

#### *Информация об авторах*

**Корниенко Герман Викторович**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Двирная Елена Вячеславовна**, инженер-исследователь, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Старцев Олег Владимирович**, старший научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; главный научный сотрудник, ИФТПС СО РАН, administration@iptpn.ysn.ru

**Кротов Анатолий Сергеевич**, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., ИФТПС СО РАН, administration@iptpn.ysn.ru

#### *Information about the authors*

**German V. Kornienko**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Elena V. Dvirnaya**, Research Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Oleg V. Startsev**, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Chief Researcher, IPTPN SB RAS, administration@iptpn.ysn.ru

**Anatoliy S. Krotov**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), IPTPN SB RAS, administration@iptpn.ysn.ru

Статья поступила в редакцию 03.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.12.2025.  
The article was submitted 03.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 15.12.2025.