

Научная статья

УДК 504.37:620.19

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-156-176

ИЗУЧЕНИЕ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ СОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭКСПОЗИЦИИ В УСЛОВИЯХ ПРИМОРСКОЙ АТМОСФЕРЫ

Г.В. Корниенко¹, О.В. Старцев¹, Т.В. Александрова¹, Е.В. Двирная¹

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

Аннотация. Проведено исследование скорости осаждения солей на поверхности различных полимерных композиционных материалов, а также стандартных образцов, испытанных методами «влажной свечи» и «сухого полотна», экспонируемых в условиях приморской атмосферы в различных зонах удаления от моря. С помощью метода капиллярного электрофореза определены количество и состав солей на поверхности образцов за год экспозиции образцов. Установлена зависимость количества солей на поверхности различных образцов от продолжительности ветров со стороны моря, а также степени шероховатости образцов композиционных материалов.

Ключевые слова: скорость осаждения солей, полимерные композиционные материалы, капиллярный электрофорез, методы «влажной свечи» и «сухого полотна»

Для цитирования: Корниенко Г.В., Старцев О.В., Александрова Т.В., Двирная Е.В. Изучение скорости осаждения солей на поверхности различных полимерных композиционных материалов при экспозиции в условиях приморской атмосферы // Труды ВИАМ. 2025. № 10 (152). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-156-176.

Scientific article

STUDY OF SALT DESPOSITION RATE ON THE SURFACE OF VARIOUS FIBRE-REINFORCED PLASTIC MATERIALS DURING EXPOSURE TO A SEASIDE ATMOSPHERE

G.V. Kornienko¹, O.V. Startsev¹, T.V. Alexandrova¹, E.V. Dvirnaya¹

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

Abstract. The salt deposition rate on the surface of different fibre-reinforced plastics and standard samples of «wet candles» and «dry plates» during the exposure in a seaside atmosphere in various distances from the sea has been studied. During one year of the exposure, the content of different ions on the surface of the samples was determined by the capillary electrophoresis method. The dependence of the salt content on the surface of various samples on the duration of winds, blowing from the sea, and surface roughness profile of materials, was established.

Keywords: salt disposition rate, fibre-reinforced plastics, the capillary electrophoresis method, wet candles, dry plates

For citation: Kornienko G.V., Startsev O.V., Alexandrova T.V., Dvirnaya E.V. Study of salt desposition rate on the surface of various fibre-reinforced plastic materials during exposure to a seaside atmosphere. *Trudy VIAM*, 2025, no. 10 (152), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-156-176.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе эпоксидных матриц благодаря своим высоким прочностным характеристикам и низкой плотности все чаще используются в производстве элементов внешнего контура современной авиационной техники [1, 2]. Наиболее востребованными из них являются углепластики и стеклопластики [3, 4]. Однако со временем внешние воздействия снижают механические показатели ПКМ [5, 6]. Среди главных факторов умеренного, субтропического, тропического и пустынного климатов, оказывающих влияние на свойства композитов, выделяют повышенную и пониженную температуры, относительную влажность воздуха, осадки, солнечную радиацию [7–9]. В условиях холодного климата действуют суточные и сезонные термоциклы, которые повышают внутренние напряжения в ПКМ, ускоряют образование микротрещин и снижают прочность [10, 11].

Приморские регионы характеризуются повышенной агрессивностью внешней среды. Наряду с перечисленными факторами, агрессивность атмосферы в морском климате повышается из-за присутствия в воздухе ионов морских солей [12, 13]. В обзорах [14, 15] подробно проанализировано, как эти химически активные элементы ускоряют коррозию металлов и сплавов.

Несмотря на более высокую устойчивость ПКМ к воздействию хлоридов и других ионов морской соли в сравнении с металлами [16], физико-химические превращения, вызванные воздействием агрессивных веществ, контактирующих с ПКМ в ходе эксплуатации, являются активно изучаемой разновидностью старения [17, 18]. В обзоре [19] рассмотрено воздействие растворенных морских солей на предельную сорбцию и изменение пределов прочности и модулей упругости ПКМ, проанализированы причины неодинакового влияния дистиллированной и морской воды на свойства армирующих волокон.

Испытания на воздействие аэрозолей проводят в камерах соляного тумана. Например, углепластики [20, 21] и стеклопластики [22, 23] выдерживались в сухой и влажной атмосфере, имитирующей морской воздух. Деструкция эпоксидных матриц ускоряется с наложением УФ-излучения [21] и повышением температуры выдержки [23].

Наравне с применением камер соляного тумана широко распространены испытания образцов ПКМ в натуральной или искусственной морской воде [19, 24]. Авторы работы [25] установили, что молекулы воды, гидроксид- и хлорид-ионы реагируют с некоторыми ингредиентами армирующих наполнителей, разрушают границу между волокном и смолой и снижают свойства ПКМ. Морская вода влияет на расслоение тканого бисмалеимидного стеклопластика [26], уменьшает прочностные показатели [27] в зависимости от химического состава матрицы, природы армирующего наполнителя, окружающей температуры, уровня приложенных механических нагрузок [28]. Методические вопросы испытаний ПКМ в морской воде рассмотрены в работах [29, 30].

При учете вклада солей в старение ПКМ несомненный интерес вызывает сравнение влияния морской и дистиллированной воды на процессы влагопоглощения и соответствующие изменения их свойств [31, 32]. В табл. 1 представлены примеры относительных коэффициентов сохранения показателей $k_P = (P/P_0)$, где P – пределы прочности при растяжении (σ_t), сжатии (σ_c), межслойном сдвиге (σ_s), измеренные после различных сроков выдержки в дистиллированной и морской воде; P_0 – исходные значения соответствующих показателей [33–36]. Отмечается более значительное снижение механических показателей после нахождения ПКМ в морской воде. В таком случае процессы старения осложняются влиянием более агрессивной среды, создаваемой растворенными электролитами.

Влияние дистиллированной и морской воды на свойства ПКМ

ПКМ	Связующее	Показатель P	Тип воды	t , сут	w , %	$k_P = P/P_0$	Литературный источник
СП	Эпоксид LY5052/ NY5052	σ_c	Д	100	1,34	0,66	[33]
			М		1,34	0,66	
		σ_s	Д		1,34	0,66	
			М		1,34	0,66	
	Изофталевая полиэфирная смола Synolite	σ_t	Д	365	0,4	0,66	[34]
			М		0,9	0,66	
		E_t	Д		0,4	0,66	
			М		0,9	0,66	
УП	Эпоксид DGEBA/ МеННРА	σ_t	Д	14	0,07	0,66	[35]
			М		0,06	0,66	
		σ_s	Д	140	0,31	0,66	
			М		0,41	0,66	
	Полиуретан	σ_t	Д	180	0,6	0,66	[36]
			М		0,6	0,66	
		σ_s	Д		0,6	0,66	
			М		0,6	0,66	

Обозначения: СП – стеклопластик; УП – углепластик; P – пределы прочности при растяжении (σ_t), сжатии (σ_c), межслойном сдвиге (σ_s), модуль упругости при растяжении (E_t). Тип воды: Д – дистиллированная, М – морская; t – продолжительность выдержки в воде; w – количество сорбированной воды.

В работе [37] рассмотрено старение ПКМ на основе полипропилена после экспозиции на открытой атмосферной площадке, после погружения в воду и в 10%-ный раствор хлорида натрия на протяжении 15 недель. В результате наблюдалось снижение прочности при растяжении на 4, 19 и 31 % соответственно.

Исследования стеклопластиков на основе винилэфирной смолы показали [38], что погружение образцов в раствор хлорида и сульфата натрия (30 и 5 г/л) при температуре 60 °С оказывает эффект, соизмеримый с погружением в щелочной раствор гидроксидов натрия, калия и кальция с pH = 12,7 при тех же условиях. Показатель σ_t после 70 сут выдерживания в солевом и щелочном растворах составил 74 и 73 % соответственно, а показатель σ_s после 45 дней снизился до 90 и 94 %. Похожие испытания были проведены для базальтопластика на основе эпоксидной смолы [39]. Наборы лопаток для растяжения отдельно погружали в дистиллированную воду, раствор серной кислоты с pH = 1,5, а также в раствор хлоридов магния, натрия, кальция и сульфата натрия, имитирующий морскую воду. После 34 сут выдерживания образцов в воде и кислоте при температуре 55 °С наблюдалось снижение показателя σ_t на 20 и 22 % соответственно, а после раствора солей – на 25 %.

При климатическом старении осаждение солей также приводит к изменению микроструктуры, проявляющемуся в увеличении пористости, и, как следствие, в ухудшении качества волокна, ускорении расслаивания поверхности раздела «волокно–матрица», что приводит к изменению массы экспонированных образцов [8, 40] и значительному снижению прочностных характеристик [41, 42]. Натурные климатические испытания новых материалов являются неотъемлемой частью оценки их устойчивости к старению, установления обоснованных сроков службы и необходимым этапом ввода в эксплуатацию конструкций на их основе [43, 44]. Соответственно, одна из важных задач развития климатических испытаний – разработка и совершенствование методов оценки коррозионной агрессивности среды [45, 46].

Одними из самых распространенных методов оценки скорости осаждения хлоридов являются методы «влажной свечи» и «сухого полотна» [47, 48], регламентированные стандартом ГОСТ 9.039–74, гармонизированным с ISO 9225 [49]. Сущность данных способов отбора проб количества хлоридов заключается в экспозиции влажных и сухих тканей, на которые осаждаются ионы солей. Однако данные методы не учитывают степень шероховатости различных материалов, которая напрямую связана со скоростью осаждения и способностью удержания кристаллов солей на поверхности материалов [50]. В работе [51] показана возможность измерения массы морских солей на поверхности стеклопластика марки КМКС-4.175.Т10 и углепластика марки КМКУ-3.150.Э0.1 после 8 лет экспонирования на открытом атмосферном стенде и под навесом в условиях Геленджикского центра климатических испытаний (ГЦКИ) – НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Таким образом, цель данной работы – сравнение скорости осаждения ионов солей на поверхности «влажной свечи» и «сухого полотна» различных ПКМ, отличающихся профилем поверхности, а также исследование влияния метеорологических условий и расположения материалов на открытой климатической площадке в ГЦКИ на количество солей на поверхности материалов при экспозиции в период 04.2024–04.2025.

Материалы и методы

Полимерные композиционные материалы. В качестве исследуемых материалов с различным профилем поверхности выбраны композиты с предварительной экспозицией в течение 8 лет на открытой климатической площадке ГЦКИ: стеклопластик марки ВПС-48 и углепластик марки ВКУ-39, имеющие одинаковое связующее ВСЭ-1212 на основе бифункциональной и полифункциональной эпоксидных смол, отвержденных с помощью аминного ароматического отвердителя, а также углепластик марки КМКУ-3м на основе однонаправленной углеродной ленты УОЛ-300Р и клеевого препрега. Эти материалы рекомендованы для авиационной техники [52, 53]. Дополнительно испытаны образцы стеклопластика ВПС-48 и углепластика ВКУ-39 в исходном состоянии.

Экспозиция. Для анализа скорости осаждения хлоридов образцы ПКМ размерами (20–40)×(70–90)×(2–3) мм, а также образцы «влажных свечей» и «сухих полотен» [49] экспонировали в трех точках ГЦКИ: под навесом (40 м от береговой линии), на открытой площадке (25 м от береговой линии) и в жалюзийной будке (25 м от береговой линии).

Подготовка проб. Образцы ПКМ, «влажных свечей» и «сухих полотен» с периодичностью в 1 мес. снимали с экспозиции для подготовки проб к анализу содержания ионов солей. В случае образцов ПКМ, выдержанных на открытой площадке, съем для анализа производили несколько раз в месяц. Подготовку образцов с помощью методов «влажной свечи» и «сухого полотна» проводили в соответствии с ГОСТ 9.039–74. Для этого экспонируемую ткань помещали в химический стакан, заливали дистиллированной водой (200 см³) и кипятили на протяжении 10 мин. Образцы ПКМ также выдерживали в дистиллированной воде (200 см³), перемешивая при температуре 60 °С. Данная температура считается допустимой для испытаний ПКМ без значительного воздействия на их состояние [43]. Полученные растворы промывных вод фильтровали от различных загрязнений и доводили объем до метки в мерной колбе на 250 см³.

Анализ ионного состава проб. Для анализа ионного состава полученных проб промывных вод использовали метод капиллярного электрофореза. Анализ осуществляли на приборе «Капель-105М» при следующих условиях измерения: напряжение 17 В

для анионов и 25 В для катионов, длина волны 374 нм для анионов и 267 нм для катионов, давление ввода пробы $3 \cdot 10^{-3}$ МПа температура охлаждения капилляра 25 °С.

При анализе электрофореграмм определяли площадь пиков, соответствующих определенным ионам, по которым определяли концентрацию их в пробе (C_i). В результате получали суммарную массу солей на квадратный метр экспонируемого материала (Σm_i) в мг/м² по формуле

$$\Sigma m_i = \frac{\Sigma(C_i \cdot M_i)V}{S},$$

где C_i – концентрация иона в пробе, ммоль/см³; M_i – молярная масса иона, г/моль; V – общий объем пробы, см³ (250 см³); S – площадь экспонируемой поверхности, м².

Определение профиля поверхности ПКМ. Для определения профиля поверхности исходных образцов ПКМ и образцов после предварительной экспозиции использовали метод профилометрии с помощью 3D-сканирующего микроскопа в соответствии с ГОСТ 2789–73. На типовых участках (640×490 мкм) поверхностей лицевой и обратной сторон каждой пластины проводили определение характеристик шероховатости: максимальную (R_z) и среднеквадратичную (R_q) высоту элементов кривой профиля.

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

Обсуждение и результаты

На электрофореграммах для типичной пробы промывных вод (рис. 1) хорошо видны наибольшие пики, соответствующие ионам хлорида и натрия, основным компонентам морской соли.

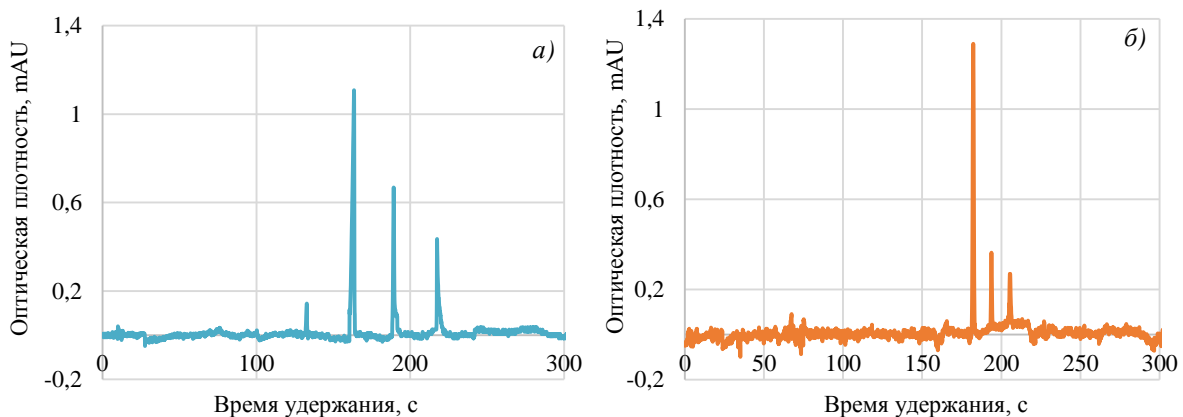


Рис. 1. Электрофореграммы анионного (а) и катионного (б) состава проб промывных вод образцов из стеклопластика ВПС-48/7781 после экспозиции под навесом в ГЦКИ с 30 сентября по 1 ноября 2024 года

В табл. 2 представлены усредненные результаты анализа ионного состава более 100 проб промывных вод «влажной свечи», «сухого полотна» и ПКМ после экспозиции в различных зонах ГЦКИ. Дополнительно для сравнения приведены результаты анализа воды Черного моря, выполненного методом капиллярного электрофореза, а также данные из литературных научно-технических источников [54, 55].

Можно заметить достаточно высокую схожесть ионного состава солей, накопленных на поверхности образцов «влажной свечи», «сухого полотна», ПКМ и состава морской воды. Данный факт доказывает возможность применения методов «влажной

свечи», «сухого полотна», а также ПКМ для сбора и дальнейшего анализа количества различных ионов, присутствующих в атмосфере, несмотря на то, что в соответствии со стандартом ГОСТ 9.039–74 методы «влажной свечи» и «сухого полотна» применяются для сбора исключительно хлорид-ионов.

Таблица 2

Средние значения ионного состава проб промывных вод «влажной свечи», «сухого полотна» и ПКМ, а также ионный состав проб воды Черного моря

Литературный источник	Проба воды	Массовая доля иона в пробе, %						
		K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	(SO ₄) ²⁻	(HCO ₃) ⁻ , (CO ₃) ²⁻
Экспериментальные результаты	Промывные воды «влажной свечи», «сухого полотна» и ПКМ (ГЦКИ)	1,0	29,8	4,1	1,8	55,3	7,7	0,8
	Вода из Черного моря (ГЦКИ)	1,2	31,6	4,1	1,6	53,8	7,1	0,5
[54]	Вода из Черного моря (г. Анапа)	1,6	30,1	3,7	1,4	55,2	7,5	0,5
[55]	Вода из Черного моря (г. Геленджик)	1,4	31,5	3,0	1,2	54,0	8,0	1,0

В табл. 3 представлены результаты определяемых ежемесячно на протяжении года значений суммарных масс солей на квадратный метр материала (Σm_i) для образцов, экспонируемых в трех зонах ГЦКИ, удаленных на разное расстояние от береговой линии.

В жалюзийной будке испытывали только образцы ПКМ после 8 лет предварительной экспозиции, а под навесом и на открытой площадке дополнительно были выставлены образцы «влажной свечи» и «сухого полотна». В качестве наглядного примера на рис. 2 приведена диаграмма изменения показателя Σm_i для разных материалов, экспонированных под навесом.

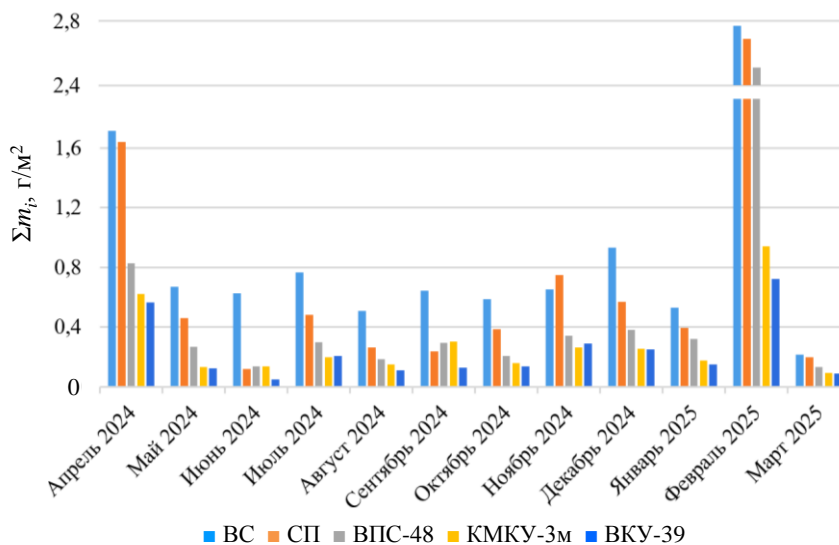


Рис. 2. Значения суммарных масс солей на квадратный метр материала (Σm_i) для образцов «влажной свечи» (BC), «сухого полотна» (СП) и ПКМ при экспозиции под навесом

Таблица 3
Результаты ежемесячного анализа массы солей, накопленных при экспозиции в различных точках, на поверхности образцов «влажной свечи», «сухого полотна», а также образцов ПКМ после предварительной экспозиции

Точка экспозиции	$\Sigma m_i, \text{ г/м}^2$												
	в жалюзийной будке для материала			под навесом для материала						на открытой площадке для материала			
	ВПС-48	КМКУ-3м	ВКУ-39	Свеча	Полотно	ВПС-48	КМКУ-3м	ВКУ-39	Свеча	Полотно	ВПС-48*	КМКУ-3м*	ВКУ-39*
Апрель 2024				1,71	1,64	0,83	0,62	0,56	15,19	11,0	14,5	5,04	3,09
Май 2024				0,67	0,46	0,27	0,13	0,13	5,86	0,02	5,38	4,08	2,81
Июнь 2024				0,63	0,12	0,14	0,14	0,05	1,14	0,24	0,24	0,19	0,18
Июль 2024				0,76	0,48	0,30	0,20	0,21	5,80	0,24	2,45	1,78	1,30
Август 2024	0,60	0,51	0,31	0,51	0,27	0,18	0,15	0,11	4,40	0,27	0,64	0,43	0,33
Сентябрь 2024	0,66	0,50	0,40	0,65	0,24	0,29	0,30	0,13	4,81	1,37	2,01	1,74	1,56
Октябрь 2024	0,78	0,48	0,32	0,59	0,39	0,21	0,16	0,14	4,79	0,03	1,72	0,95	0,77
Ноябрь 2024	0,65	0,30	0,30	0,65	0,75	0,34	0,26	0,29	2,38	0,02	1,32	0,80	0,52
Декабрь 2024	0,75	0,36	0,21	0,93	0,57	0,38	0,25	0,25	5,93	0,47	0,76	0,80	0,64
Январь 2025	0,31	0,26	0,24	0,53	0,40	0,32	0,18	0,15	2,83	0,01	0,88	0,68	0,46
Февраль 2025	1,43	2,84	1,52	2,77	2,69	2,51	0,94	0,72	23,27	0,01	23,0	10,8	9,83
Март 2025	1,8	0,28	0,22	0,21	0,20	0,13	0,09	0,09	1,68	0,01	2,04	0,44	0,46

* Для образцов ПКМ, экспонированных на открытой площадке, приведены суммарные значения Σm_i , полученные после нескольких промежуточных съёмов образцов в течение месяца.

Важно отметить отношение количества накопленных солей между различными материалами. Таким образом, наибольшее количество солей в большинстве случаев накапливается на образцах, испытанных методом «влажной свечи», меньше – на образцах, испытанных методом «сухого полотна» и еще меньше – на образцах ПКМ. Во многих работах также отмечается, что скорость осаждения солей по методу «влажной свечи» выше, чем по методу «сухого полотна» [47, 48]. Данное явление объясняется лучшей сорбционной способностью смоченной ткани, а также большей способностью метода «влажной свечи» удерживать накопленные солевые частицы за счет устройства конструкции свечи [47].

Более того, при сравнении показателя Σm_i для разных ПКМ между собой можно заметить, что почти во всех случаях наибольшее количество солей накапливается на поверхности образцов из стеклопластика ВПС-48 (94,4 %), а для образцов из углепластика КМКУ-3м в 87,5 % случаев Σm_i больше, чем для углепластика ВКУ-39. Данная закономерность объясняется различной степенью шероховатости ПКМ. В табл. 4 представлены результаты анализа профиля поверхности исследованных ПКМ.

Таблица 4

Результаты анализа профиля поверхности различных образцов ПКМ

Предыстория	Материал	Сторона	R_z , мкм	R_q , мкм
После предварительной экспозиции в течение 8 лет на открытой площадке ГЦКИ	КМКУ-3м	Лицевая	92,3	8,1
		Обратная	65,2	6,4
	ВПС-48	Лицевая	198	22,4
		Обратная	108	12,4
	ВКУ-39	Лицевая	100	7,5
		Обратная	49,6	4,6
В исходном состоянии	ВПС-48	Лицевая	20,2	1,7
		Обратная	20,8	1,5
	ВКУ-39	Лицевая	25,4	2,1
		Обратная	17,2	1,4
Обозначения: максимальная (R_z) и среднеквадратичная (R_q) высота элементов кривой профиля.				

Таким образом, среднее значение для двух сторон среднеквадратичной высоты элементов кривой профиля для образцов из стеклопластика ВПС-48 больше, чем для образцов из углепластиков КМКУ-3м и ВКУ-39 в 2,4 и 1,2 раза соответственно. В то же время скорость осаждения солей на поверхности стеклопластика ВПС-48 в разных точках экспозиции в сравнении с углепластиковыми КМКУ-3м и ВКУ-39 в среднем больше в 1,8 и 1,4 раза соответственно. Данное наблюдение показывает, что уникальность поверхности ПКМ, выраженная ее различным профилем, вносит вклад в способность образцов накапливать и удерживать соли, в то время как стандартные методы «влажной свечи» и «сухого полотна» не учитывают данный фактор.

Другим важным фактором воздушной атмосферы ГЦКИ, влияющим на значение Σm_i для всех наблюдаемых образцов, является ветер. В приморских районах основное насыщение материалов солями происходит под воздействием морской воды, которая снимается с поверхности моря в виде аэрозоля и наносится на поверхности материалов при сильном ветре [56]. В табл. 5 представлены важнейшие параметры ветра за период исследований.

Показатели скорости и направления ветра в ГЦКИ за период апрель 2024–март 2025

Месяц	Скорость ветра, м/с	Максимальная скорость ветра v_{max} , м/с	Направление сильного ветра (10 м/с)	Длительность сильного (>10 м/с) ветра (t_{10}), ч
Апрель 2024	3,3	23,8	ССВ	39
Май 2024	4,2	20,3	ССВ	80
Июнь 2024	3,2	13,6	ССВ	6
Июль 2024	4,6	17,7	СВ	55
Август 2024	2,0	8,0	–	0
Сентябрь 2024	1,8	7,0	–	0
Октябрь 2024	3,4	16,9	СВ	20
Ноябрь 2024	3,4	16,5	СВ	13
Декабрь 2024	4,2	15,2	ССВ	17
Январь 2025	3,0	16,4	СВ	28
Февраль 2025	6,4	26,1	СВ	152
Март 2025	3,1	15,4	СВ	10

Обозначения: СВ – северо-восток; ССВ – северо-северо-восток.

Важно отметить, что основные направления сильных ветров на протяжении всего исследования – северо-восток и северо-северо-восток, т. е. со стороны моря. Таким образом, в месяцы наиболее продолжительных и сильных ветров со стороны моря, таких как апрель и май 2024 года и февраль 2025 года, наблюдалось наибольшее значение показателя Σm_i для всех материалов на всех точках экспозиции. На примере сильных ветров в мае и июле 2024 года видно, что сильный ветер оказывает большее влияние на образцы, экспонированные ближе к морю на открытой площадке (25 м), чем под навесом (40 м). Значение Σm_i для образцов, экспонированных в жалюзийной будке (25 м) в 88 % случаев больше, чем для образцов из того же материала, расположенных под навесом, и меньше, чем для образцов на открытой площадке.

Несмотря на одинаковое расстояние от моря в случае экспозиции на открытой площадке и в жалюзийной будке, наблюдается различие полученных значений Σm_i , которое можно объяснить меньшей доступностью для ветров из-за препятствий в виде жалюзийных стенок. Дополнительный вклад в наблюдаемое различие может вносить периодичность съема образцов для анализа. Как уже упоминалось ранее, образцы, экспонированные под навесом и в жалюзийной будке, снимали для анализа один раз в месяц, в то время как образцы ПКМ со стенда на открытой площадке снимали после сильных ветров несколько раз на протяжении месяца, смывали соли для анализа и выставляли обратно на экспозицию до следующих сильных ветров. В табл. 3 для образцов ПКМ с открытой площадки приведены значения Σm_i , полученные после нескольких съёмов в течение каждого месяца.

При анализе результатов для образцов, экспонируемых на открытой площадке, особый интерес вызывает сравнение значений Σm_i для ПКМ, полученных во время промежуточных съёмов, со значениями Σm_i для методов «влажной свечи» и «сухого полотна», полученных в результате ежемесячных съёмов (табл. 3). С учетом особенности экспозиции без защиты от воздействия осадков логично предположить, что значительное количество солей на поверхности образцов будет оставаться лишь в том случае, если между сильным ветром со стороны моря и съёмом образцов для анализа количества солей не наблюдалось осадков. Для образца, испытанного методом «сухого полотна», такие результаты наблюдались только в апреле и сентябре 2024 года, в остальные месяцы результаты для показателя Σm_i не имеют значения, чего нельзя сказать про метод «влажной свечи».

В случае образца, испытанного методом «влажной свечи», экспонированного на открытой площадке, наблюдается отчетливая линейная зависимость результатов ежемесячных съёмов с суммарными значениями Σm_i для ПКМ после нескольких съёмов в течение месяца. На рис. 3 представлены зависимости параметра Σm_i для образца «влажной свечи» и различных ПКМ, выдержанных под навесом и на открытой площадке.

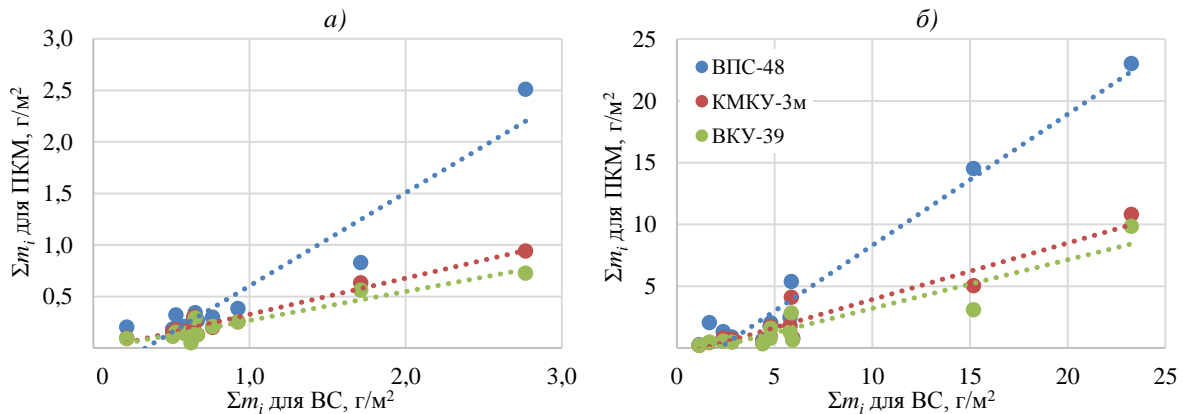


Рис. 3. Зависимость результатов измерения Σm_i для образцов, испытанных методом «влажной свечи» (ВС), и различных ПКМ при 12-месячной экспозиции под навесом (а) и на открытой площадке (б)

Видно подобие результатов, полученных при экспозиции в двух точках ГЦКИ и при разной частоте съёмов образцов ПКМ. Важно также отметить достаточно высокую линейную зависимость полученных результатов: среднее значение квадрата коэффициента корреляции Пирсона (R^2) для результатов образцов, экспонированных под навесом и на стенде на открытой площадке, составило 0,92 и 0,91 соответственно.

Исходя из полученных результатов, можно предположить, что при воздействии осадков (в отличие от образцов «сухого полотна») образцы «влажной свечи» способны удерживать соли в растворе благодаря своему устройству, что позволяет экспонировать их не только под специальными навесами в соответствии с ГОСТ 9.039–74, но и на открытых пространствах – например, непосредственно на стенде вместе с реальными образцами для более точной оценки коррозионной активности атмосферы именно в данной точке экспозиции.

Для более детального изучения зависимости скорости осаждения солей на разных образцах, экспонированных в различных зонах, посчитан коэффициент R^2 между значениями Σm_i всех образцов друг с другом, полученными за 12 мес. экспозиции (табл. 6). Результаты для ПКМ представлены в виде средних значений R^2 , посчитанных отдельно для материалов ВПС-48, КМКУ-3м и ВКУ-39. Прослеживается закономерно низкая корреляция результатов, полученных методом «сухого полотна», для образцов, экспонированных на открытой площадке, с результатами других образцов, чего нельзя сказать об образцах, измеренных методом «влажной свечи», экспонированных в тех же условиях. При этом коэффициент R^2 для результатов, полученных методом «влажной свечи», для образцов, экспонированных на открытой площадке и в соответствии с ГОСТ 9.039–74 под навесом, составляет 0,95. При исключении из анализа результатов, полученных методом «сухого полотна», для образцов, экспонированных на открытой площадке, среднее значение R^2 для всех образцов в сравнении друг с другом равно 0,91, что показывает высокую линейную зависимость результатов для всех образцов вне зависимости от точки экспозиции.

Таблица 6
Значение коэффициента корреляции R^2 между значениями Σm_i для различных образцов при экспозиции 12 мес. в разных зонах ГЦКИ, а также между значениями Σm_i и основными показателями ветра

Материал (зона экспозиции)	R^2									
	ПКМ (ЖБ)	ВС (Н)	СП (Н)	ПКМ (Н)	ВС (ОП)	СП (ОП)	ПКМ (ОП)	v_{max} , м/с	t_{10} , Ч	t_{15} , Ч
ПКМ (ЖБ)	0,97	0,92	0,93	0,91	0,95	0,03	0,98	0,61	0,94	0,98
ВС (Н)	0,92	1,00	0,93	0,92	0,95	0,13	0,88	0,59	0,65	0,78
СП (Н)	0,93	0,93	1,00	0,93	0,91	0,14	0,87	0,67	0,64	0,78
ПКМ (Н)	0,91	0,92	0,93	0,86	0,89	0,14	0,83	0,56	0,59	0,74
ВС (ОП)	0,95	0,95	0,91	0,89	1,00	0,17	0,91	0,6	0,67	0,78
СП (ОП)	0,03	0,13	0,14	0,14	0,17	1,00	0,09	0,16	0,00	0,00
ПКМ (ОП)	0,98	0,88	0,87	0,83	0,91	0,09	0,94	0,65	0,81	0,9
v_{max} , м/с	0,61	0,59	0,67	0,56	0,6	0,16	0,65	1,00	0,66	0,55
t_{10} , Ч	0,94	0,65	0,64	0,59	0,67	0,00	0,81	0,66	1,00	0,9
t_{15} , Ч	0,98	0,78	0,78	0,74	0,78	0,00	0,9	0,55	0,9	1,00

Обозначения: ПКМ – полимерный композиционный материал; ВС – образцы по методу «влажной свечи»; СП – образцы по методу «сухого полотна»; v_{max} – максимальная скорость ветра; t_{10} и t_{15} – длительность ветра со скоростью более 10 и 15 м/с соответственно; ЖБ – экспозиция в жалюзийной будке; Н – экспозиция под навесом; ОП – экспозиция на открытой площадке.

Для более подробного изучения зависимости скорости осаждения солей от скорости ветра проведен анализ изменения коэффициента корреляции R^2 для зависимости значений Σm_i для разных образцов от продолжительности ветров, превышающих 5, 6, ... 20 м/с (рис. 4).

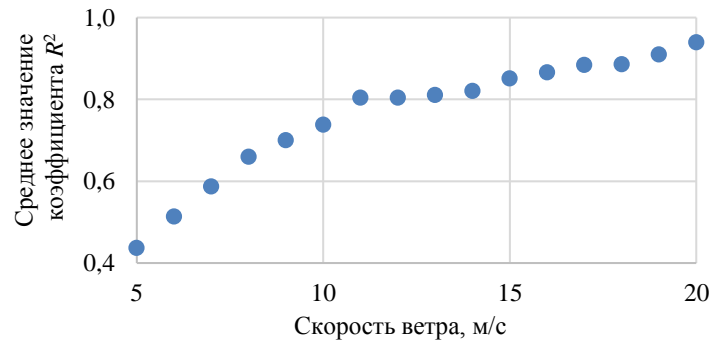


Рис. 4. Зависимость значений коэффициента корреляции R^2 между средними результатами Σm_i для методов «влажной свечи», «сухого полотна», ПКМ и минимальным значением скорости ветра, используемым при фильтрации

Видно, что с увеличением минимальной учитываемой скорости ветра коэффициент R^2 непрерывно увеличивается. Однако за период апрель 2024–март 2025 скорость ветра >20 м/с наблюдалась всего в трех месяцах, в связи с чем оптимальным выбором минимальной скорости можно считать 10–15 м/с.

Для подтверждения и уточнения полученных результатов проведен сравнительный анализ скорости осаждения солей на поверхность стеклопластика ВПС-48 и углепластика ВКУ-39 в исходном состоянии и после предварительной экспозиции. В табл. 7 представлены результаты Σm_i , полученные в ходе промежуточных съемов с экспозиции на открытой площадке ГЦКИ в период с 1 января по 1 апреля 2025 года, преимущественно после сильных ветров.

Таблица 7

Результаты определения скорости осаждения солей на поверхности образцов ПКМ с разной предысторией в ходе экспозиции на открытой площадке ГЦКИ

Дата съема с экспозиции	Σm_i , г/м ²			
	после предварительной экспозиции материала		в исходном состоянии материала	
	ВПС-48	ВКУ-39	ВПС-48	ВКУ-39
09.01.2025	0,35	0,14	0,07	0,07
15.01.2025	0,51	0,30	0,06	0,04
03.02.2025	0,01	0,01	0,01	0,00
12.02.2025	8,77	4,95	1,66	2,03
19.02.2025	0,99	1,01	0,49	0,77
25.02.2025	13,00	3,61	1,64	2,40
04.03.2025	0,26	0,26	0,08	0,09
21.03.2025	1,29	0,37	0,23	0,27
01.04.2025	0,74	0,09	0,06	0,04

Как отмечено ранее, скорость осаждения солей на поверхности состаренных образцов из стеклопластика ВПС-48 больше, чем на поверхности образцов из углепластика ВКУ-39. Однако в случае исходных образцов наблюдается скорее обратная тенденция, особенно в случае больших значений Σm_i . Во всех случаях для состаренных образцов наблюдаются более высокие значения Σm_i , чем для исходных. Эта закономерность объясняется гораздо более гладкой поверхностью исходных образцов (табл. 3). На рис. 5 представлены профили поверхности образцов ПКМ в двух состояниях – хорошо видно увеличение рельефа поверхности в ходе экспозиции. Неровности на поверхности образца создают условия для захвата и лучшего удержания кристаллов солей, которые способствуют дальнейшей более активной деструкции.

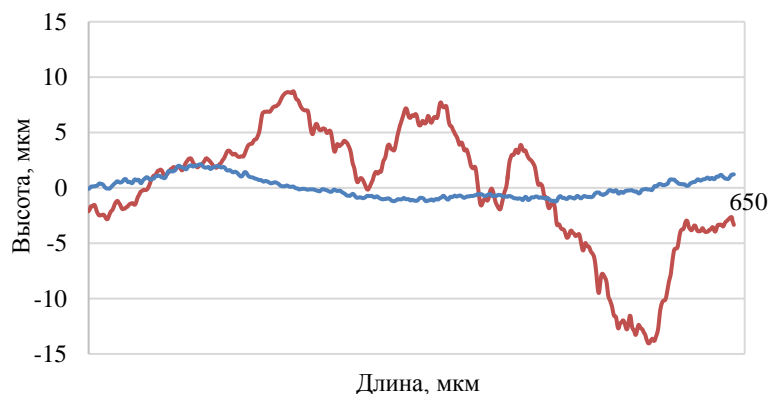


Рис. 5. Профиль поверхности образца стеклопластика ВПС-48 в исходном состоянии (—) и после предварительной экспозиции в ГЦКИ (—)

Таким образом, агрессивность среды выражается в разной степени по отношению к разным ПКМ на разных стадиях старения. Несмотря на высокую корреляцию скорости осаждения солей на поверхности различных материалов в разных точках экспозиции, для более точного анализа влияния солей на свойства ПКМ в приморской атмосфере необходимо учитывать индивидуальные особенности материалов и все факторы, способные влиять на скорость осаждения и способность удерживать частицы солей на поверхности материалов.

Заключения

Методом капиллярного электрофореза проведен анализ более 300 проб промывных вод «влажной свечи», «сухого полотна» и образцов ПКМ. Установленный ионный состав солей на поверхности образцов соответствует составу морской воды, что показывает возможность применения методов «влажной свечи» и «сухого полотна», а также образцов ПКМ для анализа содержания различных ионов в приморской атмосфере.

Установлено, что в ряду «влажная свеча–сухое полотно–образцы ПКМ после предварительной экспозиции–исходные образцы ПКМ» наблюдается снижение способности накапливать и удерживать соли на поверхности. Данная тенденция коррелирует со степенью неровности профиля поверхности.

Доказано, что, в отличие от метода «сухого полотна», метод «влажной свечи» пригоден для анализа скорости осаждения солей не только в крытых сооружениях в соответствии с ГОСТ 9.039–74, но и на стендах на открытых площадках под прямым воздействием осадков.

Вычислены квадраты коэффициентов корреляции Пирсона между значениями Σm_i между всеми образцами «влажной свечи», «сухого полотна» и ПКМ, экспонированными в разных зонах ГЦКИ. Среднее значение R^2 составило 0,91.

Показано, что скорость осаждения солей возрастает с увеличением порога фильтрации минимальной скорости сильных ветров со стороны моря.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00009.

Список источников

1. Irving P., Soutis C. Polymer composites in the aerospace industry. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2019. 688 p. DOI: 10.1017/aer.2020.118.
2. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник РАН. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
3. Xu X., Peng G., Zhang B. et al. Material performance, manufacturing methods, and engineering applications in aviation of Carbon fiber reinforced polymers: A comprehensive review // Thin-Walled Structures. 2024. Vol. 209. Art. 112899. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112899.
4. 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: 05.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
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). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-39-51.
6. Qin G., Fan Q., Mi P. et al. Review of aging mechanisms, mechanical properties, and prediction models of fiber-reinforced composites in natural environments // Polymer Composites. 2024. Vol. 45. No. 16. P. 14448–14474. DOI: 10.1002/pc.28799.
7. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors // Russian Metallurgy (Metally). 2012. Vol. 2012. No. 4. P. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.
8. Старцев В.О., Валева Е.О., Варданян А.М., Нечаев А.А. Оценка стабильности авиационных углепластиков к атмосферным осадкам // Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники. М., 2021. Ст. 05.
9. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
10. Каблов Е.Н., Лебедев М.П., Старцев О.В., Голиков Н.И. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур // В сборнике: Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD–2013. Якутск, 2013. С. 5–7.
11. Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // Известия Алтайского государственного университета. 2020. № 1 (111). С. 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06.
12. Vidinha H., Branco R., Amaro A.M., Neto M.A. Monotonic and fatigue behavior of notched glass fibre-reinforced polymer laminates immersed in seawater // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2023. Vol. 126. Art. 103977. DOI: 10.1016/j.tafmec.2023.103977.
13. Ghabezi P., Harrison N.M. Multi-scale modelling and life prediction of aged composite materials in salt water // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2024. Vol. 43. No. 3–4. P. 205–219. DOI: 10.1177/07316844231160189.

14. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. № 12. С. 6–18.
15. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 2. Новые подходы к оценке коррозивности приморских атмосфер // *Коррозия: материалы, защита*. 2016. № 1. С. 1–15.
16. Raman R.K.S., Guo F., Al-Saadi S., Zhao X.L. Understanding fibre-matrix degradation of FRP composites for advanced civil engineering applications: an overview // *Corrosion and Materials Degradation*. 2018. Vol. 1. No. 1. P. 27–41. DOI: 10.3390/cmd1010003.
17. Старцев В.О. Влияние агрессивных жидкостей на свойства полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 8 (114). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-98-112.
18. Cao Y., Gao G., Wang W. et al. Deterioration behaviors of phenolic amine/epoxy-based GFRP laminates exposed to aggressive environments // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2025. Vol. 192. Art. 108788. DOI: 10.1016/j.compositesa.2025.108788.
19. Старцев В.О. Старение полимерных композиционных материалов в морской воде (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-148-170.
20. Yang Y., Silva M.A.G., Silva R.J.C. Material degradation of CFRP-to-steel joints subjected to salt fog // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 173. Art. 106884. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.05.095.
21. Deng K., Luo B., Suo H. et al. Characterization of material degradation mechanism of carbon fiber reinforced epoxy resin composites under ultraviolet radiation and salt-fog synergistic environment // *Polymer Composites*. 2024. Vol. 45. No. 1. P. 805–824. DOI: 10.1002/pc.27816.
22. Fiore V., Calabrese L., Miranda R., Badagliacco D. An experimental investigation on performances recovery of glass fiber reinforced composites exposed to a salt-fog/dry cycle // *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol. 257. Art. 110693. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110693.
23. 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. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111214.
24. Anderson E., Gunawan B., Nicholas J. A multicontinuum-theory-based approach to the analysis of fiber-reinforced polymer composites with degraded stiffness and strength properties due to moisture absorption // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. No. 2. Art. 421. DOI: 10.3390/jmse11020421.
25. Wang D., Gong Q., Yuan Q., Luo S. Review of the properties of fiber-reinforced polymer-reinforced seawater–sea sand concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. Vol. 33. No. 10. Art. 04021285. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003894.
26. Zhao Y., Liu W., Seah L.K., Chai G.B. Delamination growth behavior of a woven E-glass/bismaleimide composite in seawater environment // *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 106. P. 332–343. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.045.
27. Gellert E.P., Turley D.M. Seawater immersion ageing of glass-fibre reinforced polymer laminates for marine applications // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999. Vol. 30. No. 11. P. 1259–1265. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00037-8.
28. Nan J., Zhi C., Meng J., Miao M. Seawater aging effect on fiber-reinforced polymer composites: Mechanical properties, aging mechanism, and life prediction // *Textile Research Journal*. 2023. Vol. 93. No. 13–14. P. 3393–3413. DOI: 10.1177/00405175231152666.
29. Kini M.V., Pai D. The ageing effect on static and dynamic mechanical properties of fibre reinforced polymer composites under marine environment – a review // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 52. No. 3. P. 689–696. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.084.30.26.

30. Ghabezi P., Harrison N.M. Indentation characterization of glass/epoxy and carbon/epoxy composite samples aged in artificial salt water at elevated temperature // *Polymer Testing*. 2022. Vol. 110. Art. 107588. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107588.
31. Shetty K., Bojja R., Srihari S. Effect of hygrothermal aging on the mechanical properties of IMA/M21E aircraft-grade CFRP composite // *Advanced Composites Letters*. 2020. Vol. 29. Art. 2633366X2092652. DOI: 10.1177/2633366X20926520.
32. Yang S., Chu M., Chen F. et al. Effect of different environmental conditions on durabilities of polyester and vinylester-based glass-fiber-reinforced polymer pultruded profiles // *Frontiers in Materials*. 2022. Vol. 9. Art. 862872. DOI: 10.3389/fmats.2022.862872.
33. Srihari S., Revathi A., Rao R. Hygrothermal effects on RT-cured glass-epoxy composites in immersion environments. Part B: Degradation studies // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2002. Vol. 21. No. 11. P. 993–1002. DOI: 10.1177/073168402128987653.
34. Wang J., GangaRao H., Liang R. Durability of glass fiber-reinforced polymer composites under the combined effects of moisture and sustained loads // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015. Vol. 34. No. 21. P. 1739–1754. DOI: 10.1177/0731684415596846.
35. Kafodya I., Xian G., Li H. Durability study of pultruded CFRP plates immersed in water and seawater under sustained bending: Water uptake and effects on the mechanical properties // *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 70. P. 138–148. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.10.034.
36. Hong B., Xian G., Li H. Comparative study of the durability behaviors of epoxy and polyurethane-based CFRP plates subjected to the combined effects of sustained bending and water/seawater immersion // *Polymers*. 2017. Vol. 9. No. 11. Art. 603. DOI: 10.3390/polym9110603.
37. Fakhrol T., Islam M.A. Degradation behavior of natural fiber reinforced polymer matrix composites // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 56. P. 795–800. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.03.198.
38. Chen Y., Davalos J.F., Ray I., Kim H.Y. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures // *Composite structures*. 2007. Vol. 78. No. 1. P. 101–111. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.08.015.
39. Wu G., Wang X., Wu Z. Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments // *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 49. No. 7. P. 873–887. DOI: 10.1177/0021998314526628.
40. Старцев В.О., Старцев О.В., Зеленева Т.О., Варданян А.М. Влияние осадков на изменение массы образцов полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-136-154.
41. Lu Z., Xie J., Zhang H., Li J. Long-term durability of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) sheets and the epoxy resin matrix under a wet–dry cyclic condition in a chloride-containing environment // *Polymers*. 2017. Vol. 9. No. 12. Art. 652. DOI: 10.3390/polym9120652.
42. Bhat R., Mohan N., Sharma S. Influence of seawater absorption on the hardness of glass fiber/polyester composite // *Journal of Computers Mechanical Management*, 2022. Vol. 1. No. 1. P. 1–11. DOI: 10.57159/gadl.jcmm.1.1.23003.
43. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. II. Развитие методов исследования ранних стадий старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2020. № 1. С. 15–21. DOI: 10.31044/1814-4632-2020-1-15-21.
44. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
45. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // *Деформация и разрушение материалов*. 2019. № 12. С. 7–16. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-12-7-16.

46. Першина Н.А., Ионин В.А., Полищук А.И. Влияние близости моря и коррозионно-активных агентов атмосферы на скорость коррозии в различных климатических регионах // *Климат–2018: Вопросы прогнозирования коррозии, старения и биоповреждения материалов*. М., 2018. С. 227–238.
47. Ветрова Е.Ю., Щекин В.К., Курс М.Г. Сравнительная оценка методов определения коррозионной агрессивности атмосферы // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 74–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81.
48. Жирнов А.Д., Стрекалов П.В., Каримова С.А., Жиликов В.П. Сезонная динамика процесса коррозии металлов на береговой зоне Черного моря // *Коррозия: материалы, защита*. 2007. № 8. С. 23–29.
49. ГОСТ 9.039–74. ЕСЗКС. Коррозионная агрессивность атмосферы. М.: Изд-во стандартов, 1974. 39 с.
50. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С., Медведев И.М., Фролов А.С. Коррозия и старение поверхности конструкционных материалов по данным 3D микроскопии // *Труды ВИАМ*. 2014. № 12. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-12-12.
51. Старцев В.О., Куцевич К.Е., Хрулев К.А., Молоков М.В. Прогнозирование температуры поверхности образцов композиционных материалов на основе клеевых препрегов при экспонировании в климатических условиях // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2017. № 9. С. 24–31.
52. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р., 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). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-11-11.
53. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов // *Труды ВИАМ*. 2016. № 8 (44). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
54. Толкачев А.П. Особенности химического состава морской воды // *Шаг в науку*. 2019. № 3. С. 115–117.
55. Андрулионис Н.Ю., Завьялов И.Б., Рождественский С.А. Основной ионный состав вод Керченского пролива и прилегающих акваторий // *Морской гидрофизический журнал*. 2024. Т. 40. № 1 (235). С. 87–107.
56. Панченко Ю.М., Маршаков А.И., Ненашева Т.А. и др. Коррозионная стойкость конструкционных металлов при разной ориентации образцов на различных расстояниях от морского берега // *Коррозия: защита материалов и методы исследований*. 2024. № 2. С. 29–44. DOI: 10.61852/2949-3412-2024-2-2-29-44.

References

1. Irving P., Soutis C. *Polymer composites in the aerospace industry*. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2019, 688 p. DOI: 10.1017/aer.2020.118.
2. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
3. Xu X., Peng G., Zhang B. et al. Material performance, manufacturing methods, and engineering applications in aviation of Carbon fiber reinforced polymers: A comprehensive review. *Thin-Walled Structures*, 2024, vol. 209, art. 112899. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112899.
4. 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: April 05, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

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), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-39-51.
6. Qin G., Fan Q., Mi P. et al. Review of aging mechanisms, mechanical properties, and prediction models of fiber-reinforced composites in natural environments. *Polymer Composites*, 2024, vol. 45, no. 16, pp. 14448–14474. DOI: 10.1002/pc.28799.
7. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, vol. 2012, no. 4, pp. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.
8. Startsev V.O., Valevin E.O., Vardanyan A.M., Nechaev A.A. Evaluation of the stability of aircraft carbon fiber reinforced plastics to atmospheric precipitation. *New generation materials and technologies for advanced products of aviation and space technology*. Moscow, 2021, art. 05.
9. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
10. Kablov E.N., Lebedev M.P., Startsev O.V., Golikov N.I. Climatic tests of materials, structural elements, machinery and equipment under conditions of extremely low temperatures. *Proc. VI Eurasian Symposium on the Problems of Strength of Materials and Machines for Cold Climate Regions EURASTRENCOLD–2013*. Yakutsk, 2013, pp. 5–7.
11. Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Aging of polymer composite materials in extremely cold climates. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 1 (111), pp. 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06.
12. Vidinha H., Branco R., Amaro A.M., Neto M.A. Monotonic and fatigue behavior of notched glass fibre-reinforced polymer laminates immersed in seawater. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, vol. 126, art. 103977. DOI: 10.1016/j.tafmec.2023.103977.
13. Ghabezi P., Harrison N.M. Multi-scale modelling and life prediction of aged composite materials in salt water. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2024, vol. 43, no. 3–4, pp. 205–219. DOI: 10.1177/07316844231160189.
14. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M., Panin S.V. Corrosive aggressiveness of the coastal atmosphere. Part 1. Influencing factors (review). *Korroziya: materialy, zashchita*, 2013, no. 12, pp. 6–18.
15. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Corrosive aggressiveness of the coastal atmosphere. Part 2. New approaches to assessing the corrosivity of coastal atmospheres. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2016, no. 1, pp.1–15.
16. Raman R.K.S., Guo F., Al-Saadi S., Zhao X.L. Understanding fibre-matrix degradation of FRP composites for advanced civil engineering applications: an overview. *Corrosion and Materials Degradation*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 27–41. DOI: 10.3390/cmd1010003.
17. Startsev V.O. Effect of aggressive liquids on properties of polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-98-112.
18. Cao Y., Gao G., Wang W. et al. Deterioration behaviors of phenolic amine/epoxy-based GFRP laminates exposed to aggressive environments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, vol. 192, art. 108788. DOI: 10.1016/j.compositesa.2025.108788.
19. Startsev V.O. The degradation of polymer composite materials in seawater (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 05, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-148-170.
20. Yang Y., Silva M.A.G., Silva R.J.C. Material degradation of CFRP-to-steel joints subjected to salt fog. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 173, art. 106884. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.05.095.
21. Deng K., Luo B., Suo H. et al. Characterization of material degradation mechanism of carbon fiber reinforced epoxy resin composites under ultraviolet radiation and salt-fog synergistic environment. *Polymer Composites*, 2024, vol. 45, no. 1, pp. 805–824. DOI: 10.1002/pc.27816.

22. Fiore V., Calabrese L., Miranda R., Badagliacco D. An experimental investigation on performances recovery of glass fiber reinforced composites exposed to a salt-fog/dry cycle. *Composites Part B: Engineering*, 2023, vol. 257, art. 110693. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110693.
23. 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. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111214.
24. Anderson E., Gunawan B., Nicholas J. A multicontinuum-theory-based approach to the analysis of fiber-reinforced polymer composites with degraded stiffness and strength properties due to moisture absorption. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, no. 2, art. 421. DOI: 10.3390/jmse11020421.
25. Wang D., Gong Q., Yuan Q., Luo S. Review of the properties of fiber-reinforced polymer-reinforced seawater–sea sand concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, vol. 33, no. 10, art. 04021285. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003894.
26. Zhao Y., Liu W., Seah L.K., Chai G.B. Delamination growth behavior of a woven E-glass/bismaleimide composite in seawater environment. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 106, pp. 332–343. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.045.
27. Gellert E.P., Turley D.M. Seawater immersion ageing of glass-fibre reinforced polymer laminates for marine applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999, vol. 30, no. 11, pp. 1259–1265. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00037-8.
28. Nan J., Zhi C., Meng J., Miao M. Seawater aging effect on fiber-reinforced polymer composites: Mechanical properties, aging mechanism, and life prediction. *Textile Research Journal*, 2023, vol. 93, no. 13–14, pp. 3393–3413. DOI: 10.1177/00405175231152666.
29. Kini M.V., Pai D. The ageing effect on static and dynamic mechanical properties of fibre reinforced polymer composites under marine environment – a review. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 52, no. 3, pp. 689–696. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.084.30.26.
30. Ghabezi P., Harrison N.M. Indentation characterization of glass/epoxy and carbon/epoxy composite samples aged in artificial salt water at elevated temperature. *Polymer Testing*, 2022, vol. 110, art. 107588. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107588.
31. Shetty K., Bojja R., Srihari S. Effect of hygrothermal aging on the mechanical properties of IMA/M21E aircraft-grade CFRP composite. *Advanced Composites Letters*, 2020, vol. 29, art. 2633366X2092652. DOI: 10.1177/2633366X20926520.
32. Yang S., Chu M., Chen F. et al. Effect of different environmental conditions on durabilities of polyester and vinylester-based glass-fiber-reinforced polymer pultruded profiles. *Frontiers in Materials*, 2022, vol. 9, art. 862872. DOI: 10.3389/fmats.2022.862872.
33. Srihari S., Revathi A., Rao R. Hygrothermal effects on RT-cured glass-epoxy composites in immersion environments. Part B: Degradation studies. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2002, vol. 21, no. 11, pp. 993–1002. DOI: 10.1177/073168402128987653.
34. Wang J., GangaRao H., Liang R. Durability of glass fiber-reinforced polymer composites under the combined effects of moisture and sustained loads. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, vol. 34, no. 21, pp. 1739–1754. DOI: 10.1177/0731684415596846.
35. Kafodya I., Xian G., Li H. Durability study of pultruded CFRP plates immersed in water and seawater under sustained bending: Water uptake and effects on the mechanical properties. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 70, pp. 138–148. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.10.034.
36. Hong B., Xian G., Li H. Comparative study of the durability behaviors of epoxy and polyurethane-based CFRP plates subjected to the combined effects of sustained bending and water/seawater immersion. *Polymers*, 2017, vol. 9, no. 11, art. 603. DOI: 10.3390/polym9110603.
37. Fakhrol T., Islam M.A. Degradation behavior of natural fiber reinforced polymer matrix composites. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 56, pp. 795–800. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.03.198.

38. Chen Y., Davalos J.F., Ray I., Kim H.Y. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. *Composite structures*, 2007, vol. 78, no. 1, pp. 101–111. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.08.015.
39. Wu G., Wang X., Wu Z. Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments. *Journal of Composite Materials*, 2015, vol. 49, no. 7, pp. 873–887. DOI: 10.1177/0021998314526628.
40. Startsev V.O., Startsev O.V., Zeleneva T.O., Vardanyan A.M. Influence of precipitation on changes in the mass of samples of polymeric composite materials in open climatic conditions. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 05, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-136-154.
41. Lu Z., Xie J., Zhang H., Li J. Long-term durability of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) sheets and the epoxy resin matrix under a wet–dry cyclic condition in a chloride-containing environment. *Polymers*, 2017, vol. 9, no. 12, art. 652. DOI: 10.3390/polym9120652.
42. Bhat R., Mohan N., Sharma S. Influence of seawater absorption on the hardness of glass fiber/polyester composite. *Journal of Computer Mechanical Management*, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.57159/gadl.jcmm.1.1.23003.
43. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of polymer composite materials for aviation purposes. II. Development of methods for studying the early stages of aging. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2020, no. 1, pp. 15–21. DOI: 10.31044/1814-4632-2020-1-15-21.
44. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
45. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of polymer composite materials for aviation purposes. I. Assessment of the influence of significant impact factors. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2019, no. 12, pp. 7–16. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-12-7-16.
46. Pershina N.A., Ionin V.A., Polischuk A.I. The influence of the proximity of the sea and corrosive agents of the atmosphere on the corrosion rate in different climatic regions. *Climate–2018: Issues of forecasting corrosion, aging and biodeterioration of materials*. Moscow, 2018, pp. 227–238.
47. Vetrova E.Yu., Shchekin V.K., Kurs M.G. Comparative evaluation of methods for the determination of corrosion aggressivity of the atmosphere. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 74–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81.
48. Zhirnov A.D., Strekalov P.V., Karimova S.A., Zhilikov V.P. Seasonal dynamics of the metal corrosion process in the coastal zone of the Black Sea. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2007, no. 8, pp. 23–29.
49. State Standard 9.039–74. ESZKS. *Corrosive aggressiveness of the atmosphere*. Moscow: Publ. house of standards, 1974. 39 p.
50. Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S., Medvedev I.M., Frolov A.S. Corrosion and aging of structural materials surface studied by 3D microscopy. *Trudy VIAM*, 2014, no. 12, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-12-12.
51. Startsev V.O., Kutsevich K.E., Khrulev K.A., Molokov M.V. Predicting the surface temperature of composite material samples based on adhesive prepregs when exposed to climatic conditions. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2017, no. 9, pp. 24–31.
52. 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, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-11-11.
53. 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, paper no. 7. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.

54. Tolkachev A.P. Features of the chemical composition of sea water. *Shag v nauku*, 2019, no. 3, pp. 115–117.
55. Andrulionis N.Yu., Zavyalov I.B., Rozhdestvensky S.A. The main ionic composition of the waters of the Kerch Strait and adjacent waters. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2024, vol. 40, no. 1 (235), pp. 87–107.
56. Panchenko Yu.M., Marshakov A.I., Nenasheva T.A. et al. Corrosion resistance of structural metals with different orientation of samples at different distances from the seashore. *Korroziya: zashchita materialov i metody issledovaniy*, 2024, no. 2, pp. 29–44. DOI: 10.61852/2949-3412-2024-2-2-29-44.

Информация об авторах

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

Старцев Олег Владимирович, старший научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Александрова Татьяна Вадимовна, лаборант пятого разряда, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Двирная Елена Вячеславовна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Oleg V. Startsev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatiana V. Alexandrova, 5th grade Laboratory Assistant, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 02.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.06.2025.
The article was submitted 02.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 10.06.2025.