

---

Научная статья

УДК 678.83

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-13-24

## СТОЙКОСТЬ АРАМИДНЫХ ОРГАНОПЛАСТИКОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ФАКТОРОВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Г.Ф. Железина<sup>1</sup>, Г.С. Кулагина<sup>1</sup>, А.Ч. Кан<sup>1</sup>, В.О. Старцев<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Исследовано климатическое старение арамидных органических пластиков в различных природных условиях. Показано, что климатическая стойкость органических пластиков находится на уровне стойкости угле- и стеклопластиков, несмотря на более высокое водопоглощение. Сохранение прочности при растяжении органического пластика Органит 10Т после 18 лет климатического старения составляет 71 %. Органические пластики способны восстанавливать свойства после удаления сорбированной влаги. Наибольшую стойкость к климатическому старению проявляют органические пластики на основе новых арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидных расплавных связующих.

**Ключевые слова:** арамидные волокна, полимерное связующее, органический пластик, полимерные композиты, климатическое старение, водопоглощение

**Для цитирования:** Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Кан А.Ч., Старцев В.О. Стойкость арамидных органических пластиков к воздействию факторов природной среды // Труды ВИАМ. 2024. № 5 (135). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-13-24.

Scientific article

## RESISTANCE OF ARAMID ORGANIC PLASTICS TO THE EFFECTS OF NATURAL ENVIRONMENT FACTORS

G.F. Zhelezina<sup>1</sup>, G.S. Kulagina<sup>1</sup>, A.Ch. Kan<sup>1</sup>, V.O. Startsev<sup>1</sup>

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

**Abstract.** The climatic aging of aramid organic plastics in various natural environments is investigated. It is shown that the climatic stability of organic plastics is at the level of resistance of polymeric composite materials reinforced by carbon fibers and fiber glasses, despite the higher water absorption. Organic plastic Organit 10T has 71 % of tensile strength properties after 18 years of climatic aging. Organic plastics can recover their properties after removal (drying) of the sorbed moisture. Organic plastics from new Rusar-NT fiber and epoxy melt binders have the biggest resistance to climatic aging.

**Keywords:** aramid fibers, polymeric binding, organoplastics, polymeric composites, climatic aging, moisture absorption

**For citation:** Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Kan A.Ch., Startsev V.O. Resistance of aramid organic plastics to the effects of natural environment factors. *Trudy VIAM*, 2024, no. 5 (135), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-13-24.

### **Введение**

Обеспечение заданного срока службы – главное требование, предъявляемое к авиационной технике. Срок службы изделий зависит от интенсивности физико-химических процессов, протекающих в материалах под воздействием природной среды и приводящих к снижению уровня их характеристик. Полимерные композиционные материалы (ПКМ), в отличие от металлов, не подвержены коррозии, поэтому устойчивость к старению является ключевой проблемой, от решения которой зависит надежность и продолжительность эксплуатации выполненных из них конструктивных элементов [1]. Существуют различные способы обеспечения срока службы изделий из полимерных материалов: применение лакокрасочных покрытий, защитных пленок, герметиков и т. д. При этом важным направлением является совершенствование состава и структуры ПКМ с позиций повышения устойчивости к воздействию факторов природной среды.

Проблема старения особенно актуальна для арамидных органопластиков, которые благодаря своему составу (полимер, армированный полимером) имеют ряд особенностей взаимодействия с внешней средой [2]. По сравнению с композитами, армированными стеклянными и углеродными волокнами, органопластики менее устойчивы к поглощению воды, поскольку в процессе сорбции участвует не только матрица, но и арамидные волокна [3–5]. Под воздействием влаги изменяется надмолекулярная структура и снижается уровень механических свойств органических волокон [6, 7]. В то же время органопластикам свойственны такие свойства, как сродство химической природы компонентов, отсутствие градиента плотностей между матрицей и армирующим волокном, способность к релаксации внутренних напряжений как в матрице, так и в полимерных волокнах. Эти качества положительно влияют на стойкость арамидных органопластиков к климатическому старению, способствуют восстановлению свойств влагонасыщенных органопластиков после высушивания [8, 9].

В своем развитии органопластики прошли несколько этапов. На первом этапе созданы материалы на основе высокопрочных арамидных волокон СВМ. Отечественное арамидное волокно СВМ разработано в 1969 г. во Всесоюзном научно-исследовательском институте полимерных волокон (г. Мытищи) коллективом ученых под руководством профессора Г.И. Кудрявцева. Одновременно в США фирма «Дюпон» разработала и выпустила на рынок арамидные волокна под торговой маркой Kevlar.

Волокна СВМ имеют более высокое водопоглощение (до 4 %), чем разработанные впоследствии арамидные волокна второго и третьего поколения (Руслан, Русар-С и Русар-НТ).

В табл. 1 представлены сведения о стойкости органопластиков на основе волокон СВМ и Kevlar к воздействию различного климата [5, 8, 10–12] и воды [4, 13, 14]. В качестве критерия оценки стойкости материалов к действию внешних факторов использован коэффициент сохранения прочности при соответствующем виде нагружения. Данный коэффициент является величиной относительной и равен отношению предела прочности материала после старения к его исходному значению. Как показывает анализ научно-технической литературы, существенных различий климатической стойкости отечественных и зарубежных арамидных пластиков не наблюдается.

К 2005 г. разработано несколько марок органопластиков (Органит 7Т, Органит 7ТЛ, Органит 11ТЛ, Органит 18Т и др.), армированных тканью из волокна СВМ, которые внедрены в авиационные конструкции (самолеты Ту-204, Ту-214, Ту-334, Ан-140 и др.) и успешно эксплуатировались в их составе [15].

Второй этап совершенствования авиационных органопластиков – это использование арамидных волокон второго поколения типа Руслан (ООО «Каменскволокно»). Разработаны органотекстолиты Органит 12Т(М)-Рус, Органит 18Т-Рус, Органит 16Т-Рус с водопоглощением, не превышающим 2,0 % [16].

Таблица 1

**Стойкость органопластиков на основе российского волокна СВМ и зарубежного волокна Kevlar к воздействию различного климата и воды [4, 5, 8, 10–14]**

Состав (волокно/связующее)	Условия экспозиции	Вид испытаний	Коэффициент сохранения прочности
СВМ/эпоксидно-изоцианатное	3 года в условиях теплого влажного климата (г. Батуми)	Изгиб	0,82
		Растяжение	0,91
СВМ/эпоксидно-полисульфовое	4 года в условиях теплого влажного климата (г. Батуми)	Изгиб	0,73
		Растяжение	0,70
СВМ/эпоксидно-фенолформальдегидное	5 лет в условиях теплого влажного климата (г. Батуми)	Изгиб	0,61
		Растяжение	0,79
Kevlar-49/эпоксидное LFR-277	10 лет в условиях умеренно теплого климата (г. Хэмптон)	Сжатие	0,93
		Изгиб	0,96
Kevlar-49/эпоксидное F155	10 лет в условиях тропического климата (г. Веллингтон)	Сжатие	0,78
		Изгиб	0,81
СВМ/эпоксидное	30 сут увлажнения при комнатной температуре	Сдвиг	0,83
Kevlar-49/эпоксидное Sycom 985	3 мес в дистиллированной воде	Изгиб	0,75

В настоящее время работы по дальнейшему совершенствованию авиационных органопластиков ведутся за счет использования армирующих наполнителей из новых влагостойких арамидных волокон типа Русар-НТ (АО НПО «Термотекс»). По сравнению с волокнами СВМ и Руслан арамидные волокна Русар-НТ имеют более совершенную химическую и надмолекулярную структуру с точки зрения устойчивости к поглощению влаги [17].

В данной работе исследовали закономерности старения арамидных органопластиков в зависимости от условий внешней среды и состава материала: типа арамидных волокон и полимерного связующего. Цель исследований – поиск путей повышения устойчивости арамидных органопластиков к атмосферным воздействиям и увеличения срока службы изделий авиационного назначения.

### Материалы и методы

Объектами исследования являются конструкционные органопластики плотностью 1310–1350 кг/м<sup>3</sup> на основе типовых полимерных связующих и армирующих тканей. Характеристики исследуемых органопластиков представлены в табл. 2. Армирующие ткани выполнены сатиновым переплетением из арамидных нитей линейной плотности 14,3 текс и имеют поверхностную плотность ≤90 г/м<sup>2</sup>.

Исследовали старение органопластиков под влиянием естественной природной среды и в лабораторных условиях. Натурные климатические испытания органопластиков (листы толщиной до 1,5 мм без лакокрасочного покрытия) проводили в следующих климатических зонах:

- умеренно холодный климат (г. Москва);
- умеренно теплый климат (г. Геленджик);
- теплый влажный климат (г. Сочи, г. Батуми);
- холодный климат (г. Якутск).

Проведены испытания на водопоглощение (ГОСТ 4650–80), тепловлажностное старение (ГОСТ 9.707–81) и тропическую стойкость (циклический режим согласно СТП 1-595-20-100–2002).

Физико-механические характеристики органопластиков

Материал	Состав органопластика		Предел прочности при растяжении, МПа	Рабочая температура, °С
	Волокно	Связующее		
Органит 7Т	СВМ	Эпоксидно-фенол-формальдегидное	700	От -60 до 80
Органит 7ТЛ			780	От -60 до 80
Органит 10Т		Эпоксидное	740	От -60 до 150
Органит 11ТЛ		Эпоксидно-полисульфовое	680	От -60 до 80
Органит 12Т		Эпоксидное	670	От -60 до 80
Органит 16Т			720	От -60 до 180
Органит 18Т			660	От -60 до 80
Органит 12Т(М)-Рус			850	От -60 до 80
Органит 16Т-Рус	Руслан	Эпоксидное	855	От -60 до 150
Органит 18Т-Рус			820	От -60 до 80
ВКО-19		Эпоксидно-полисульфовое	820	От -60 до 80
Опытный I			880	От -60 до 150
Опытный II	Русар-НТ	Эпоксидно-полисульфовое	890	От -60 до 150

### Результаты и обсуждение

#### Влияние природной среды на стойкость арамидных органопластиков

К основным природным факторам, провоцирующим старение полимерных материалов, относят влагу, повышенную температуру и солнечную радиацию [18].

На рис. 1 показано, как изменяется прочность при изгибе серийного органопластика Органит 12Т на основе арамидных волокон первого поколения в различных условиях природной среды. Экспонировали листы органопластика на открытом стенде без защитного лакокрасочного покрытия. Экспериментальные данные аппроксимировали полиномом первой степени с коэффициентом детерминации  $R^2 > 0,9$ . Как видно из представленных данных, при увеличении продолжительности выдержки наблюдается монотонное снижение прочности при изгибе. После 5 лет экспозиции коэффициент сохранения прочности составил 0,55. Наибольшее снижение прочности наблюдается в зоне теплого влажного климата, наименьшее – в зоне умеренно холодного климата.

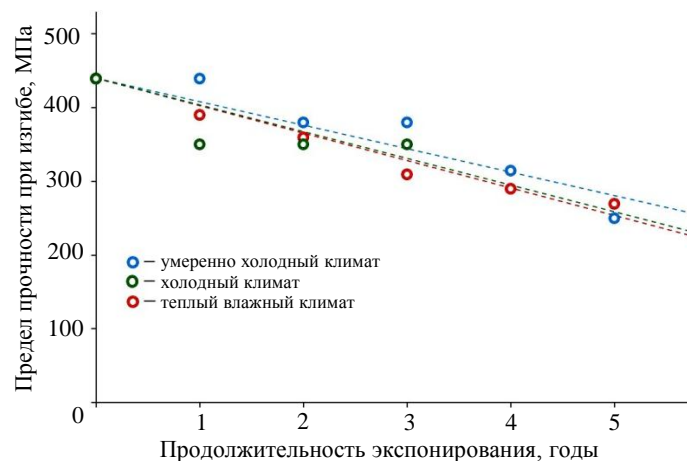


Рис. 1. Изменение прочности при изгибе органопластика Органит 12Т после экспозиции в различном климате (точки – экспериментальные значения, линии – аппроксимация полиномом первой степени)

На рис. 2 показано изменение прочности при растяжении органопластиков Органит 10Т и Органит 12Т в зоне теплого влажного климата г. Батуми. Коэффициент сохранения прочности при растяжении образцов органопластика Органит 10Т после 18 лет экспозиции на открытом стенде без защиты лакокрасочным покрытием составил 0,71; органопластика Органит 12Т после 12 лет экспозиции в незащищенном виде: 0,51. Это свидетельствует о достаточно высокой климатической стойкости арамидных органопластиков. В процессе старения органопластиков наблюдаются типичные для полимерных композитов изменения поверхности листов, влияющие на прочность материала. Следует отметить, что в изделиях эти явления минимизированы благодаря наличию лакокрасочных защитных покрытий.

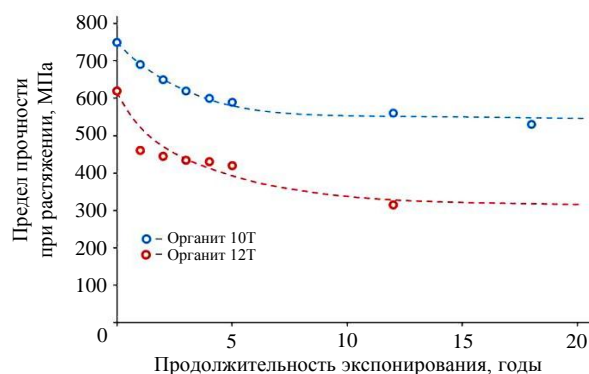


Рис. 2. Изменение прочности при растяжении органопластиков первого поколения после экспозиции в условиях теплого влажного климата (точки – экспериментальные значения, линии – аппроксимация полиномом первой степени)

В табл. 3 приведены результаты лабораторных испытаний тропической стойкости арамидных органопластиков. Показано, что коэффициент сохранения прочностных свойств органопластиков составляет  $\geq 0,74$ . Органопластик Органит 16Т-Рус второго поколения на основе арамидного волокна Руслан по сравнению с органопластиками первого поколения на основе арамидного волокна СВМ имеет повышенную стойкость к поглощению влаги в условиях тропической камеры. Известно, что коэффициент сохранения прочности стекло- и углепластиков в аналогичных условиях составляет 0,70–0,85 [19]. Таким образом, по устойчивости к тропическим условиям изученные органопластики не уступают другим ПКМ, несмотря на более высокое водопоглощение по сравнению со стекло- и углепластиками.

Таблица 3

## Тропическая стойкость органопластиков по результатам лабораторных испытаний

Материал	Характеристика	Значение прочности при продолжительности экспозиции, мес				Коэффициент сохранения прочности	Водопоглощение за 120 сут, %
		0	1	2	3		
Органит 10Т	Прочность при изгибе, МПа	470	420	450	450	0,96	2,0
Органит 11Т	Прочность, МПа: при изгибе при растяжении при сжатии	445	450	400	–	0,89	2,0
		640	590	565	560	0,87	
		195	185	180	145	0,74	
Органит 12Т	Прочность при изгибе, МПа	440	390	365	–	0,83	2,4
Органит 16Т-Рус		520	525	515	520	1,00	1,1

Для обеспечения эксплуатационной надежности ПКМ важно, чтобы поглощенная атмосферная влага не приводила к необратимым изменениям их структуры и свойств. При эксплуатации авиационной техники материалы могут подвергаться действию высоких отрицательных и положительных температур, в том числе после влагонасыщения в природной среде. На примере органопластика Органит 7ТЛ, подвергнутого тепловлажностному старению, оценили влияние последующей сушки и замораживания при температуре  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 1 мес на механические свойства материалов. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Влияние тепловлажностного старения с последующей сушкой или замораживанием на прочность органопластика Органит 7ТЛ**

Механические испытания до и после воздействия	Воздействующий фактор	Пределы прочности, МПа, при продолжительности старения, мес			
		0	2	4	10
Растяжение	Тепловлажностное старение	820	770	703	522
	Сушка после старения		890	840	755
	Замораживание после старения		790	704	544
Изгиб	Тепловлажностное старение	510	525	423	383
	Сушка после старения		572	–	567
	Замораживание после старения		476	416	358
Сжатие	Тепловлажностное старение	300	293	275	225
	Сушка после старения		368	328	314
	Замораживание после старения		290	270	223

Примечание. Условия тепловлажностного старения: относительная влажность  $98\pm 2\%$ , температура  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

После удаления сорбированной влаги предел прочности при растяжении органопластика Органит 7ТЛ восстанавливается до уровня, составляющего 92 % от исходного значения, а предел прочности при изгибе и сжатии соответствует исходным значениям. Способность к восстановлению свойств после удаления сорбированной влаги – важное качество арамидных органопластиков, положительно влияющее на их устойчивость к воздействию внешней среды. Из приведенных в табл. 4 данных также следует, что при замораживании влагонасыщенных органопластиков не происходит дополнительного снижения их прочности. Таким образом, на основе проведенных исследований установлено, что при десорбции поглощенной влаги в органопластиках наблюдается практически полное восстановление механических свойств.

Значимым фактором, влияющим на изменение свойств ПКМ в природной среде, является действие механических нагрузок. На рис. 3 показано, как изменяется прочность при растяжении органопластика Органит 7Т в условиях теплого влажного климата в свободном состоянии и в случае приложения растягивающей нагрузки (136 и 272 МПа). Экспериментальные данные аппроксимированы полиномом первой степени с коэффициентом детерминации  $R^2 > 0,9$ .

Снижение прочности при растяжении для органопластика, экспонированного в нагруженном виде, проявляется в большей степени, чем в ненагруженном материале. Уровень сохранения прочности при растяжении органопластика Органит 7Т после экспонирования в течение 5 лет в теплом влажном климате под нагрузкой составляет 70–75 % от значений предела прочности органопластика, экспонированного в свободном состоянии. Следует отметить, что предел прочности органопластика после 5 лет климатического старения под растягивающей нагрузкой остается достаточно высоким. По стойкости к одновременному воздействию климата и механических нагрузок арамидные органопластики не уступают композитам на основе стеклянных и углеродных волокон [19, 20].

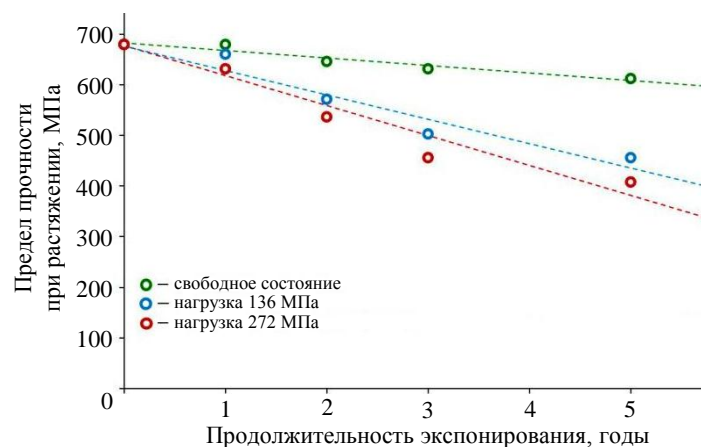


Рис. 3. Изменение прочности при растяжении органопластика Органит 7Т после экспонирования в теплом влажном климате в свободном и нагруженном состояниях (точки – экспериментальные значения, линии – аппроксимация полиномом первой степени)

### *Влияние состава арамидных органопластиков на стойкость к старению*

Одним из преимуществ ПКМ является возможность широкого варьирования их состава и структуры для достижения в конструкции требуемого уровня свойств и реализации тем самым современной концепции единства разработки «материал–технология–конструкция» [21–23]. При разработке стойких к старению ПКМ важным является выбор армирующего наполнителя и полимерной матрицы – компонентов, ответственных за уровень водопоглощения, а также стабильность свойств в условиях тепла и влаги.

На рис. 4 показано влияние типа армирующего арамидного волокна (СВМ и Руслан) на устойчивость к старению органопластиков в условиях умеренно холодного климата. Коэффициент сохранения прочности при изгибе органопластика Органит 18Т-Рус на основе ткани из нити Руслан после 5 лет экспонирования составляет 0,9, что выше, чем у органопластика Органит 18Т на основе волокна СВМ. Использование волокна Руслан взамен менее устойчивого к поглощению влаги волокна СВМ позволило существенно повысить стойкость органопластика к старению.

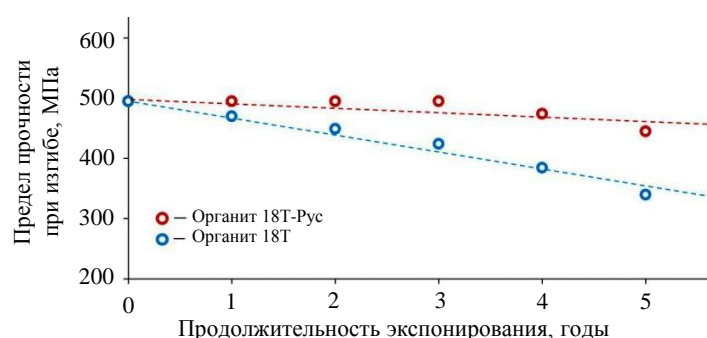


Рис. 4. Изменение прочности при изгибе органопластиков после экспонирования в умеренно холодном климате

В табл. 5 показано, как тип полимерной матрицы влияет на стойкость органопластика к тепловлажностному старению. Для изготовления органопластика использовали ткань из нитей Руслан, эпоксидные растворные (ЭДТ-69Н(М), ЭНФБ-2М) и расплавные (ВК-36, ВСК-14-3) связующие. Установлено, что органопластики на основе

расплавных эпоксидно-полисульфоновых связующих более стойки к старению. Полимерная матрица на основе расплавных эпоксидно-полисульфоновых связующих отличается повышенной герметичностью и монолитностью благодаря наличию высокомолекулярного модификатора – полисульфона, и применению безрастворной технологии получения препрега, исключающей использование растворителя и образование микропор при его удалении.

Таблица 5

Влияние типа связующего на тепловлажностное старение органопластиков

Материал	Связующее	Предел прочности при изгибе, МПа, после тепловлажностного старения, мес					
		0	0,5	1	1,5	2	3
Органит 12Т(М)-Рус	Эпоксидное растворное	455	–	445	445	450	440
Органит 18Т-Рус		500	505	500	–	500	485
ВКО-19	Эпоксидно-посульфоновое пленочное	510	–	500	–	520	500
Опытный I	Эпоксидно-посульфоновое расплавное	500	–	475	–	530	510

Примечание. Условия тепловлажностного старения: относительная влажность 98 %, температура 70 °С.

Устойчивость авиационных органопластиков к поглощению влаги зависит от вида армирующих волокон и матрицы. На рис. 5 показаны сорбционные кривые органопластиков на основе российских арамидных волокон трех поколений (СВМ, Руслан и Русар-НТ) и различных связующих.

Водопоглощение органопластиков первого поколения на основе волокон СВМ и растворных связующих составляет 2,0–2,1 %. Органопластики второго поколения на основе волокон Руслан и растворных связующих имеют уровень водопоглощения 1,6–1,8 %. Наибольшей стойкостью к поглощению влаги обладают органопластики третьего поколения на основе волокна Русар-НТ и эпоксидных модифицированных связующих расплавного типа: водопоглощение составило 1,1 %. Для определения уровней обратимого пластифицирующего воздействия влаги на свойства органопластиков можно использовать традиционные подходы [24].

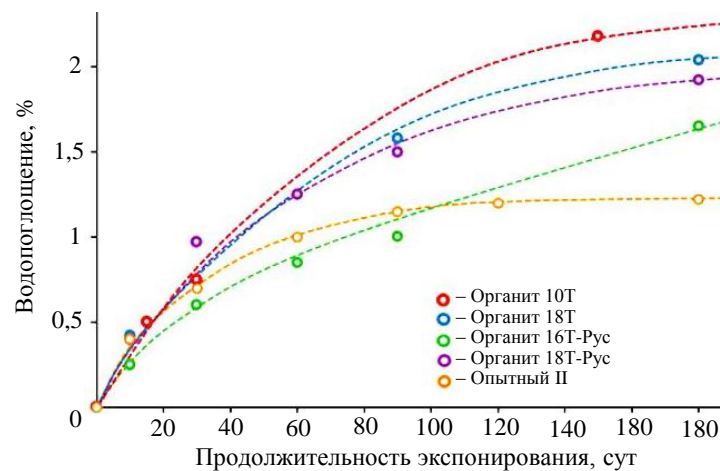


Рис. 5. Кинетика водопоглощения органопластиков на основе арамидных волокон трех поколений

Таким образом, климатическая стойкость органопластиков в значительной мере зависит от типа арамидных волокон и связующего. Перспективными являются органопластики из новых арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидных модифицированных связующих расплавленного типа. Представляет интерес использование органопластиков третьего поколения в сочетании с угле- и стеклопластиковыми конструкциями [25–27] с повышенными эксплуатационными и упруго-прочностными характеристиками.

### Заключения

Исследовано старение арамидных органопластиков в различных природно-климатических условиях. Установлено, что климатическая стойкость органопластиков находится на уровне стойкости угле- и стеклопластиков, несмотря на повышенную способность к сорбции влаги по сравнению с ними.

Коэффициент сохранения прочности при растяжении органопластика Органит 10Т после 18 лет экспонирования на открытом стенде составляет 0,71. Отличительной особенностью органопластиков является способность к восстановлению свойств после удаления влаги (сушки), сорбированной материалом при длительной экспозиции в условиях тепловлажностной среды. Показано, что арамидные органопластики не уступают стекло- и углепластикам по уровню устойчивости к одновременному воздействию природной среды и механических нагрузок.

Установлено, что климатическая стойкость органопластиков зависит от типа арамидных волокон и связующего. Наибольшую стойкость имеют материалы на основе новых арамидных волокон типа Русар-НТ и эпоксидных модифицированных связующих расплавленного типа. Применение новых климатически стойких органопластиков позволит повысить надежность работы авиационной техники при ее базировании в различных районах земного шара.

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

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
2. Mashinskaya G.P., Perov B.V. Principles of developing organic fibre-reinforced plastics for aircraft engineering // *Polymer Matrix Composites: Soviet Advanced Composites Technology*. London: Chapman & Hall, 1995. P. 305–425.
3. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. № 11. С. 19–27.
4. Garanina S.D., Shul G.S., Lebedev L.B. et al. Effect of water on the properties of organic plastics // *Mechanics of Composite Materials*. 1985. Vol. 20. P. 454–457.
5. Startsev O.V., Krotov A.S., Mashinskaya G.P. Climatic ageing of organic fiber reinforced plastics: water effect // *International Journal of Polymeric Materials*. 1997. Vol. 37. P. 161–171.
6. Kurzemnieks A.K. Structural deformation properties of organic fibers based on para-polyamides // *Mechanics of Composite Materials*. 1979. Vol. 15. P. 7–10.
7. Vijayan K. Effect of environmental exposure on the aramid fibre Kevlar // *Metals Materials and Processes*. 2000. Vol. 12. P. 259–268.
8. Startseva L.T. Climatic ageing of organic fiber reinforced plastics // *Mechanics of Composite Materials*. 1984. Vol. 29. P. 620–626.

9. Bulmanis V.N., Popov N.S., Starzhenetskaya T.A. et al. Effect of alternating thermocycling and humidity on the strength of wound glass-fiber and organic-fiber plastics // *Mechanics of Composite Materials*. 1989. Vol. 24. P. 782–789.
10. Булманис В.Н., Старцев О.В. Прогнозирование изменения прочности полимерных волокнистых композитов в результате климатического воздействия. Якутск, 1988. 32 с.
11. Baker D.J. Ten-year ground exposure of composite materials used on the Bell model 206L helicopter flight service program: NASA Technical Paper 3468, ARL Technical Report 480. Hampton, VA, 1994. 54 p.
12. Dexter H.B. Long-term environmental effects and flight service evaluation of composite materials: NASA TM-89067. Hampton, VA, 1987. 188 p.
13. Haque A., Copeland C.W., Zadoo D.P., Jeelani S. Hygrothermal influence on the flexural properties of kevlar-graphite/epoxy hybrid composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1990. Vol. 9. P. 602–613.
14. Ramesh C., Arumugam V., Stanley J., Kumar V. Effects of hydrolytic aging on glass/epoxy, kevlar/epoxy, and hybrid (glass/kevlar/epoxy) composites // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013. Vol. 2. P. 1589–1596.
15. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Плетинь П.И., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А. Разработка и производство конструкционных органопластиков для авиационной техники // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2012. Т. 14. № 4. С. 411–416.
16. Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 368–378. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-368-378.
17. Железина Г.Ф., Тихонов И.В., Черных Т.Е., Бова В.Г., Войнов С.И. Арамидные волокна третьего поколения Русар НТ для армирования органотекстолитов авиационного назначения // *Пластические массы*. 2019. № 3–4. С. 43–47.
18. Чайкун А.М., Венедиктова М.А., Смирнов Д.Н., Герасимов Д.М. Исследование влияния атмосферных факторов на основные характеристики герметизирующих материалов авиационного назначения // *Труды ВИАМ*. 2019. № 2 (74). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-58-67.
19. Андреева Н.П., Павлов М.Р., Николаев Е.В., Курносов А.О. Исследование влияния воздействия атмосферных факторов на свойства полимерного конструкционного стеклопластика на цианэфирной основе в естественных условиях холодного, умеренного и тропического климата // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-105-114.
20. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
21. Велигодский И.М., Коваль Т.В., Курносов А.О., Мараховский П.С. Исследование климатической стойкости образцов стеклопластика после натурной экспозиции в различных климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2022. № 11 (117). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
22. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 14. С. 16–21.
23. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
24. Васильева Е.Д., Васильева А.А., Кычкин А.К. К вопросу о методах исследования воздействия влаги на полимерные композиционные материалы // *Материаловедение. Энергетика*. 2022. Т. 28. № 1. С. 21–31. DOI: 10.18721/JEST.28102.
25. Zhang S., Karbhari V.M., Reynaud D. NOL-ring based evaluation of freeze and freeze-thaw exposure effects on FRP composite column wrap systems // *Composites. Part B*. 2001. Vol. 32. P. 589–598.

26. Muralidharan M., Sathishkumar T.P., Rajini N. et al. Evaluation of tensile strength retention and service life prediction of hydrothermal aged balanced orthotropic carbon/glass and kevlar/glass fabric reinforced polymer hybrid composites // *Journal of Applied Polymer Science*. 2022. Vol. 139. No. 6. P. 51602.
27. Agarwal S., Pai Y., Pai D., Mahesha G.T. Assessment of ageing effect on the mechanical and damping characteristics of thin quasi-isotropic hybrid carbon-Kevlar/epoxy intraply composites // *Cogent Engineering*. 2023. Vol. 10. Art. 223511.

### References

1. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
2. Mashinskaya G.P., Perov B.V. Principles of developing organic fibre-reinforced plastics for aircraft engineering. *Polymer Matrix Composites: Soviet Advanced Composites Technology*. London: Chapman & Hall, 1995, pp. 305–425.
3. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite materials for aviation purposes. I. Aging mechanisms. *Deformation and destruction of materials*, 2010, no. 11, pp. 19–27.
4. Garanina S.D., Shul G.S., Lebedev L.B. et al. Effect of water on the properties of organic plastics. *Mechanics of Composite Materials*, 1985, vol. 20, pp. 454–457.
5. Startsev O.V., Krotov A.S., Mashinskaya G.P. Climatic ageing of organic fiber reinforced plastics: water effect. *International Journal of Polymeric Materials*, 1997, vol. 37, pp. 161–171.
6. Kurzemnieks A.K. Structural deformation properties of organic fibers based on para-polyamides. *Mechanics of Composite Materials*, 1979, vol. 15, pp. 7–10.
7. Vijayan K. Effect of environmental exposure on the aramid fibre Kevlar. *Metals Materials and Processes*, 2000, vol. 12, pp. 259–268.
8. Startseva L.T. Climatic ageing of organic fiber reinforced plastics. *Mechanics of Composite Materials*, 1984, vol. 29, pp. 620–626.
9. Bulmanis V.N., Popov N.S., Starzhenetskaya T.A. et al. Effect of alternating thermocycling and humidity on the strength of wound glass-fiber and organic-fiber plastics. *Mechanics of Composite Materials*, 1989, vol. 24, pp. 782–789.
10. Bulmanis V.N., Startsev O.V. *Prediction of changes in the strength of polymer fiber composites as a result of climatic influences*. Yakutsk, 1988, 32 p.
11. Baker D.J. *Ten-year ground exposure of composite materials used on the Bell model 206L helicopter flight service program*: NASA Technical Paper 3468; ARL Technical Report 480. Hampton, VA, 1994, 54 p.
12. Dexter H.B. *Long-term environmental effects and flight service evaluation of composite materials*: NASA TM-89067. Hampton, VA, 1987, 188 p.
13. Haque A., Copeland C.W., Zadoo D.P., Jeelani S. Hygrothermal influence on the flexural properties of kevlar-graphite/epoxy hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1990, vol. 9, pp. 602–613.
14. Ramesh C., Arumugam V., Stanley J., Kumar V. Effects of hydrolytic aging on glass/epoxy, kevlar/epoxy, and hybrid (glass/kevlar/epoxy) composites. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2013, vol. 2, pp. 1589–1596.
15. Zhelezina G.F., Voinov S.I., Pletin P.I., Veshkin E.A., Satdinov R.A. Development and production of structural organoplastics for aviation technology. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, vol. 14, no. 4, pp. 411–416.
16. Zhelezina G.F., Gulyaev I.N., Soloveva N.A. Aramide organic plastics of new generation for aviation designs. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 368–378. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-368-378.
17. Zhelezina G.F., Tikhonov I.V., Chernykh T.E., Bova V.G., Voinov S.I. Third generation aramid fibers Rusar NT for reinforcing organotextolites for aviation purposes. *Plasticheskiye massy*, 2019, no. 3–4, pp. 43–47.

18. Chaykun A.M., Venediktova M.A., Smirnov D.N., Gerasimov D.M. Features of the influence of atmospheric factors on the main technical characteristics of sealing materials of various types of aviation purposes. *Trudy VIAM*, 2019, no. 2 (74), paper no. 06. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: December 15, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-58-67.
19. Andreeva N.P., Pavlov M.R., Nikolaev E.V., Kurnosov A.O. Research of climatic factors influence of cold, temperate (moderate) and tropical climates on properties of construction fibreglass. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 15, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-105-114.
20. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 15, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-4-70-80.
21. 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), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 24, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
22. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 14, pp. 16–21.
23. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
24. Vasilyeva E.D., Vasilyeva A.A., Kychkin A.K. On the question of methods for studying the effects of moisture on polymer composite materials. *Materialovedenie. Energetika*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 21–31. DOI: 10.18721/JEST.28102.
25. Zhang S., Karbhari V.M., Reynaud D. NOL-ring based evaluation of freeze and freeze-thaw exposure effects on FRP composite column wrap systems. *Composites. Part B*, 2001, vol. 32, pp. 589–598.
26. Muralidharan M., Sathishkumar T.P., Rajini N. et al. Evaluation of tensile strength retention and service life prediction of hydrothermal aged balanced orthotropic carbon/glass and kevlar/glass fabric reinforced polymer hybrid composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, vol. 139, no. 6, p. 51602.
27. Agarwal S., Pai Y., Pai D., Mahesha G.T. Assessment of ageing effect on the mechanical and damping characteristics of thin quasi-isotropic hybrid carbon-Kevlar/epoxy intraply composites. *Cogent Engineering*, 2023, vol. 10, art. 223511.

**Информация об авторах**

**Железина Галина Федоровна**, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Кулагина Галина Серафимовна**, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Кан Алексей Чангирович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

**Information about the authors**

**Galina F. Zhelezina**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Galina S. Kulagina**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Aleksey Ch. Kan**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

Статья поступила в редакцию 05.04.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.04.2024.

The article was submitted 05.04.2024; approved and accepted for publication after reviewing 19.04.2024.