

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-147-156

**ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА  
ЧЕРЕЗ НУЛЕВОЕ ЗНАЧЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ ЦЕЛОСТНОСТЬ  
ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА. Часть 1. Увлажнение***А.Б. Лаптев<sup>1</sup>, Г.Г. Матишов<sup>2</sup>, А.А. Кривушина<sup>1</sup>, М.Р. Павлов<sup>1</sup>, Е.В. Николаев<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

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия; ssc-ras@ssc-ras.ru

**Аннотация.** С использованием известных физических зависимостей описаны процессы увлажнения поверхности и сорбции влаги полимерным материалом. Влагонасыщение зависит от размеров пор, краевого угла смачивания поверхности – гидрофильности полимера, температуры и давления. Показано, что влагонасыщение приводит к образованию градиента влагосодержания и постепенному разрушению, образованию трещин, старению и выкрашиванию полимера с поверхности за счет действия растягивающих напряжений при наличии градиента влажности между поверхностными и внутренними слоями полимерного материала.

**Ключевые слова:** полимер, гидрофильность, краевой угол смачивания, влагонасыщение, градиент содержания влаги, капиллярное давление

**Для цитирования:** Лаптев А.Б., Матишов Г.Г., Кривушина А.А., Павлов М.Р., Николаев Е.В. Влияние перехода температуры воздуха через нулевое значение на поверхностную целостность полимерного материала. Часть 1. Увлажнение // Труды ВИАМ. 2025. № 11 (153). Ст. 13. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-147-156.

Scientific article

**THE EFFECT OF THE TRANSITION OF AIR TEMPERATURE  
THROUGH ZERO ON THE SURFACE INTEGRITY  
OF A POLYMER MATERIAL. Part 1. Moistening***A.B. Laptev<sup>1</sup>, G.G. Matishov<sup>2</sup>, A.A. Krivushina<sup>1</sup>, M.R. Pavlov<sup>1</sup>, E.V. Nikolaev<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

<sup>2</sup>Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia; ssc-ras@ssc-ras.ru

**Abstract.** The article describes processes of surface moistening and moisture sorption with a polymer material using known physical dependencies. Moisture saturation depends on size of pores, surface contact angle (polymer hydrophilicity), temperature and pressure. It is shown that moisture saturation leads to the formation of a moisture content gradient and gradual destruction, cracking, aging and discoloration of the polymer from the surface due to tensile stresses in the presence of a moisture gradient between the surface and inner layers of the polymer material.

**Keywords:** polymer, hydrophilicity, wetting edge angle, moisture saturation, moisture content gradient, capillary pressure

**For citation:** Laptev A.B., Matishov G.G., Krivushina A.A., Pavlov M.R., Nikolaev E.V. The effect of the transition of air temperature through zero on the surface integrity of a polymer material. Part 1. Moistening. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), paper no. 13. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-147-156.

## Введение

Воздействие климата на материалы чрезвычайно разнообразно. Наиболее изученным фактором воздействия климата является влажность, вызывающая влагонасыщение материала [1–5]. Тем не менее процесс старения в результате циклической сорбции и десорбции влаги материалом изучен недостаточно.

Поверхность материала подвержена ускоренной деструкции и выкрашиванию (выветриванию) микрочастиц материала. От химической природы поверхности, ее физико-химических свойств зависит способность удерживать то или иное количество влаги и снега [6].

На рис. 1 приведены данные [7] относительного изменения массы образца полимерного материала при длительном экспонировании на климатической площадке при действии всех факторов климата.



Рис. 1. Относительное изменение массы образца в процессе длительного экспонирования в натуральных условиях

Видно, что масса изменяется скачкообразно, т. е. присутствуют два процесса — обратимое влагонасыщение при увеличении массы и обратимая сушка образца при снижении массы, при этом на всем протяжении эксперимента происходит унос частиц (массы) материала с поверхности, приводящий к постоянному и невозвратному снижению массы.

Процесс циклического увлажнения-сушки приводит к уносу вещества. Деструкция поверхности, образование выкрошенных микрочастиц и их унос с поверхности может быть обусловлен не только действием влаги, но прежде всего образованием механических напряжений в поверхностном слое материала. Процесс влияния влаги достаточно хорошо изучен для таких материалов, как древесина. Коробление древесины под действием влаги известно давно, но также известно, что сушка древесины не приводит к удалению последствий коробления (деформации), т. е. происходят необратимые изменения. По-видимому, эти изменения происходят и в полимерных материалах, но из-за низкой пористости и влагоемкости они не подвержены короблению, у них повреждаются только поверхностные слои.

Помимо влаги на материал в различных климатических условиях значительное воздействие оказывает температура. При этом температура поверхности отличается от температуры окружающего воздуха из-за периодического воздействия солнечного излучения, ветра и механических нагрузок. Температура поверхности значительно зависит от цвета нанесенного покрытия. Светлая поверхность в натуральных условиях при наличии солнечного излучения имеет более низкую температуру, чем темная. Большое влияние также оказывают осадки (жидкие и твердые) — одни приводят к насыщению поверхностных слоев влагой, другие — к механическому воздействию и эрозии [8].

На сухой (не содержащей влаги) поверхности переход температуры воздуха через ноль не приводит к каким-либо серьезным изменениям. Для влажной поверхности при снижении температуры окружающего воздуха и переходе через ноль меняется

фазовое состояние воды – образуется лед. Необходимо отметить, что даже в сухом климате возможно образование на поверхности сорбированной влаги. В зависимости от количества и величины пор в материале влага может находиться в виде мономолекулярного (связанная влага) или полимолекулярного (свободная влага) слоя.

Толщина слоя воды в свою очередь во многом определяется капиллярными эффектами – осмотическим давлением, поверхностным натяжением жидкости, адсорбционной способностью поверхности по отношению к воде, шероховатостью поверхности и другими факторами.

В источнике [9] изучен химический состав углепластика на основе полимерной матрицы ВСЭ-1212 после длительного экспонирования в условиях умеренного климата. Показано, что при исследовании на инфракрасном спектрометре проявляется рост амплитуды сигналов в области, соответствующей частичному разрушению сшивающих структуру полимера пространственных связей и наличию большого количества абсорбированной воды. После сушки углепластика вода уходит из внутренней структуры, но не полностью, а пики, характерные для гидроксильных групп, остаются.

На рис. 2 [10, 11] приведен фрактографический анализ полимерной матрицы необработанной внешней кромки, у которой диаметр пор составляет до 50 мкм. Однако исследования геометрических характеристик поперечного сечения полимерного композиционного материала и морфологии поверхности углеродных волокон показали наноразмерные поры. На изображениях, приведенных на рис. 3, показана характерная форма поперечного сечения волокон (от округлой до овальной), у которых средний диаметр составляет от 3,2 до 7,0 мкм, поверхность волокон – фибриллизованная.

Наличие адгезива на волокнах и их неровная поверхность приводят к образованию вдоль волокон наноразмерных микропор (показаны стрелками на рис. 3, а и б).

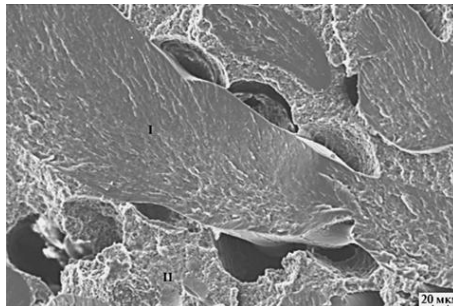


Рис. 2. Структура поврежденного образца полимерной матрицы

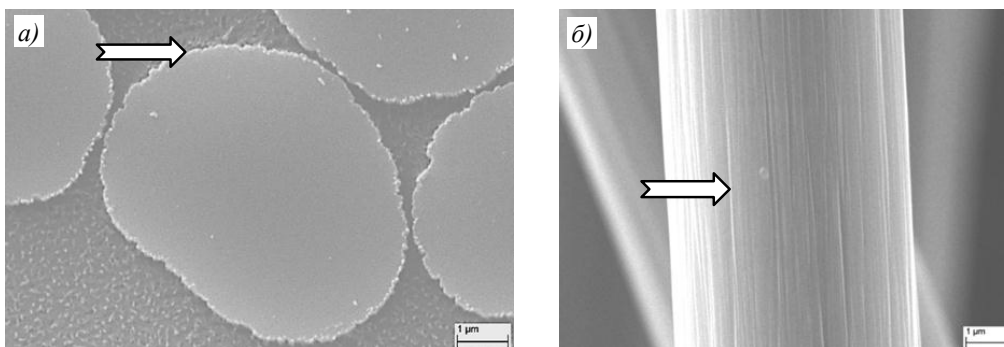


Рис. 3. Поперечное сечение (а) и поверхность углеродных волокон (б) при увеличении  $\times 30000$  [11]

### Образование пленки воды на поверхности материала

Появление влаги на поверхности зависит от термодинамических условий и при нормальном атмосферном давлении называется точкой росы [12]. Расчет температуры

точки росы  $T_p$  при температуре воздуха  $T$  и относительной влажности  $\phi$  может быть выполнен по формуле [13]

$$T_p = \frac{a\chi}{b - \chi}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$  – коэффициенты, определяемые для каждого материала индивидуально;  
 $\chi = \frac{237,7T}{17,27 + T} + \ln\left(\frac{\phi}{100}\right)$ .

В результате выпадения осадков влага попадает непосредственно на поверхность и удерживается на ней в зависимости от свойств поверхности, ее наклона и других условий. При этом высота слоя воды  $h$  на горизонтальной плоской гладкой поверхности определяется следующим уравнением [14]:

$$h = \sqrt{\frac{2\sigma(1 - \cos\theta)}{g\rho}}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости;  $\theta$  – угол смачивания.

При падении капли воды на поверхность материала образуется несколько разделов фаз на границах материала, воды и воздуха, которые подразделяются на следующие границы раздела фаз: между твердым веществом и жидким (т-ж), между жидким веществом и газом (ж-г) и между твердым веществом и газом (т-г), которым соответствуют величины поверхностного натяжения –  $\sigma_{т-ж}$ ,  $\sigma_{ж-г}$  и  $\sigma_{т-г}$ . Они же определяют баланс сил на границе раздела фаз. Равновесия этих сил можно представить уравнением [15]

$$\cos\theta = \sigma_{т-г} - \sigma_{ж-г}. \quad (3)$$

В результате исследования значительного количества материалов с разным химическим составом установлено, что чем меньше реакционная способность вещества (например, фторсодержащего), тем меньше значение критической поверхностной энергии [16], т. е. для насыщения поверхностной влагой материала необходимо не только наличие влаги на поверхности, но и физико-химическое взаимодействие воды с поверхностью. Чем меньше краевой угол смачивания (гидрофильный материал), тем лучше взаимодействие с поверхностью и интенсивнее влагонасыщение материала.

При переходе от гладкой поверхности к шероховатой [17] можно значительно улучшить гидрофобные свойства материала и увеличить краевой угол смачивания, которые невозможно получить на гладких, пусть и гидрофобных, поверхностях.

Сила поверхностного натяжения  $\sigma_{т-ж}$  для гидрофильных материалов всегда больше, чем величина  $\sigma_{ж-г}$ , поэтому на рельефной поверхности между жидкостью и твердым материалом во впадинах рельефа создается воздушная прослойка. Эта прослойка снижает общее поверхностное натяжение и увеличивает краевой угол смачивания. Преднамеренное создание рельефа (шероховатости) на поверхности позволяет увеличить гидрофобность поверхности материала. Дополнительно увеличить гидрофобность и снизить проникновение влаги внутрь материала можно с использованием специальных гидрофобизирующих покрытий.

Под воздействием внешней среды гидрофильность, гидрофобность и энергия поверхностей, на которые нанесено какое-либо покрытие, могут изменяться. Попадание частиц аэрозолей, пыли, песка и кислых газов из атмосферы постепенно, но неуклонно приводит к преобразованию групп молекул на поверхности, образованию гидрофильных комплексов, нарушению сплошности гидрофобной пленки, влагонасыщению материала (чем длительнее воздействие внешней среды, тем интенсивнее изменения).

Вода на поверхности всегда содержит то или иное количество загрязняющих частиц и растворимых примесей – ионов. Минерализованная вода в наноразмерных капиллярах и микропорах вступает во взаимодействие со стенками полимера/волокна за счет сил физической и химической адсорбции. Чем выше гидрофильность поверхности,

тем, соответственно, больше сила взаимодействия влаги и стенок капилляра/поры. При  $\sigma_{т-ж} < \sigma_{ж-г}$  влага в капилляре образует двойной электрический мономолекулярный слой толщиной до 0,2 нм (рис. 4). На стенке полимерного материала, заряженной отрицательно, адсорбируются положительным зарядом своих диполей молекулы воды и положительно заряженные ионы. Следующий слой молекул воды (толщиной 0,2–1,0 нм) также ориентируется к отрицательному заряду адсорбированных молекул воды, но плотность и ориентация второго слоя несколько меньше. Энергия статических электрических связей во втором слое высока. В третьем слое (толщиной 1–10 нм) молекулы и ионы менее ориентированы (менее структурированы). Энергия статического электрического взаимодействия на таком удалении от стенки капилляра незначительна. В четвертом слое, толщина которого ограничена лишь стенками капилляра и толщинами первых слоев, содержится свободная вода, где ориентационные молекулярные взаимодействия, за исключением гидратных оболочек ионов, равны нулю. С увеличением энергии системы за счет увеличения температуры или давления толщина третьего слоя уменьшается, молекулы дезориентируются. Критические изменения толщины слоя начинаются при температуре 60–80 °С. На толщину упорядоченного слоя оказывает влияние количество гидратированных ионов.

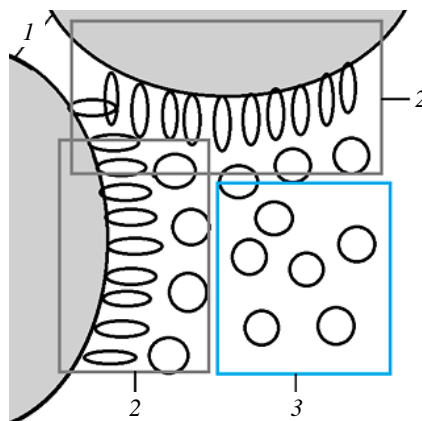


Рис. 4. Схема расположения слоев структурированной (2) и свободной (3) воды в капилляре (1)

Молекулы воды в капилляре совершают броуновское движение, при этом молекулы принимают положение с минимальной энергией. Если поверхностное натяжение воды меньше энергии адсорбционного взаимодействия воды с материалом капилляра, вода начинает заполнять стенки с силой, называемой капиллярным давлением.

Существует методология оценки поглощения влаги материалом – диффузии, характеризующейся коэффициентом диффузии. Основная теория и методы определения коэффициента диффузии влаги приведены в работах [18, 19]. В источниках [20–22] приведены наиболее информативные методы исследования кинетики сорбции, которые заключаются в достижении сорбционного равновесия в конкретных условиях. Метод, приведенный в работе [23], позволяет не только оценить коэффициент диффузии, но и исследовать структурные изменения в полимерной матрице.

Зависимость степени влагонасыщения от продолжительности экспонирования определяется уравнением  $w = at^b$ , где  $w$  – влагосодержание;  $t$  – продолжительность выдержки при заданных значениях температуры и влажности;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты, определяемые для каждого материала индивидуально.

Коэффициент  $b = 1/2$  при соответствии диффузии второму закону Фика [24]. Обычно данный коэффициент имеет другое значение, что означает наличие изменений в структуре абсорбата или наличие химических превращений.

**Энергетическое и силовое воздействия влаги**

Для учета энергетического силового воздействия влаги на стенки капилляра необходимо рассмотреть взаимодействие потока молекул воды в виде пара со стенками капилляра [25], которое представляет собой разнородные процессы: потока, соответствующего теории Кнудсена в капиллярах радиусом  $<r_{Kn}$ , и потока молекул воды под действием броуновского движения в капиллярах радиусом  $>r_{Kn}$ . Поток газообразных молекул воды в соответствии с теорией Кнудсена будет равен

$$J_1^{Kn} = -2/3(8RT/\pi M_1)^{1/2} \int_{r_0}^{r_{Kn}} r f_V(r) dr \nabla p \quad (4)$$

или

$$J_1^{Kn} = -D^{Kn} \nabla p, \quad (5)$$

где  $D^{Kn}$  – коэффициент диффузии при движении пара в соответствии с теорией Кнудсена;  $r_{Kn}$  – наибольший радиус пор, поток в которых соответствует теории Кнудсена;  $M_1$  – молекулярная масса водяного пара;  $T$  – температура;  $r$  – радиус капилляра, нм;  $f_V(r)$  – функция изменения объема пор по толщине материала;  $\nabla p$  – градиент давления по толщине материала.

Коэффициент диффузии по теории Кнудсена равен

$$D^{Kn} = (260329 \cdot 10^{-10} (T)^{1/2} \int_{r_0}^{r_{Kn}} r f_V(r) dr) / d_1, \quad (6)$$

где  $d_1$  – коэффициент извилистости пор.

Уравнение (4) ограничено параметрами  $r_{max}$  и  $r_0$ . Согласно зависимости энергии ДЛФО (теория агрегативной устойчивости В.Б. Дерягина, Л.Д. Ландау, Е. Фервея и Дж. Овербека) [26], действие межмолекулярных сил начинается на расстоянии  $r_0 < 20$  радиусов молекулы воды. Диаметр молекулы воды 0,1345 нм при комнатных условиях (температура 273,15 К, атмосферное давление), тогда  $r_0 = 2,69$  нм, а относительное давление водяного пара  $p/p_s = 0,6$ . Необходимо учитывать, что первоначально в порах присутствует воздух и учитывать нужно совместную сорбцию и пара, и воздуха.

Содержание влаги  $u$  при диффузии в капиллярах под действием температуры и ультрафиолетового излучения отличается на поверхности материала и по его сечению. При изменении влажности воздуха, температуры и осадках содержание влаги может быть больше в центре или на поверхности. В зависимости от разницы температур материала и окружающей среды диффузия влаги может происходить как под действием давления влаги, так и под действием капиллярных сил. В любом случае важное значение имеет градиент давления влаги  $\partial p / \partial x$ . Если  $\partial p / \partial x = 0$ , уравнение термовлагопроводности имеет вид [27]

$$\partial u / \partial \tau = a_m (\partial^2 u / \partial x^2 + \delta_t (\partial^2 t / \partial x^2)),$$

где  $a_m$  и  $\delta_t$  – коэффициенты, зависящие от температуры и влагосодержания материала,  $\tau$  – продолжительность выдержки.

При нагревании тела объемно-напряженное состояние определяется неравномерным распределением температуры.

Внутреннее давление в порах  $P$ , приводящее к образованию трещин и расширению пор в материале при разности влагосодержания между слоями  $\Delta u$ , может быть определено по формуле

$$P = -\frac{2}{3} \frac{\beta_1 E \Delta u}{(1 + \beta_1 u_i)(1 - \mu)},$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости;  $\beta_1$  – коэффициент линейной усадки.

### Заключения

Полимерные материалы, такие как лакокрасочные покрытия, композиты, пластмассы и другие, в процессе длительной эксплуатации в натуральных условиях подвержены старению под действием климатических факторов. Один из значимых факторов старения – увлажнение и влагонасыщение материала. Влагонасыщение приводит к появлению растягивающих напряжений при наличии градиента влажности между поверхностными и внутренними слоями полимерного материала.

В процессе старения полимерных материалов происходит образование новых химических межмолекулярных связей, приводящих к охрупчиванию материала, из-за чего со временем материал становится более хрупким и сильнее подвержен разрушающему действию растягивающих напряжений под действием градиента влагонасыщения. Этот процесс в зависимости от длительности и уровня воздействия климатических факторов (температуры, ультрафиолетового излучения, осадков и влаги) приводит к выкрашиванию микрочастиц полимера и постепенному выветриванию их с поверхности, что приводит к снижению массы, образованию микрповреждений поверхности и снижению прочности и долговечности конструкций.

Для замедления процесса старения полимерных материалов под действием климатических факторов необходимо поддерживать поверхность в гидрофобном состоянии, снижать градиент влагонасыщения в объеме материала, т. е. избегать значительных перепадов температур и влажности в большие промежутки времени – например, избегать длительного влагонасыщения и затем длительного воздействия высокой температуры.

Интенсивность процесса влагонасыщения во многом зависит от пористости материала – чем меньше пористость, тем ниже влагонасыщение, однако размер пор имеет обратное влияние, т. е. чем меньше размер пор, тем больше силы капиллярного давления и интенсивнее насыщение влагой.

*Публикация подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-528 от 24.04.2024 на реализацию КНП по приоритетным направлениям научно-технологического развития).*

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-70-80.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
4. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 2. Основные тенденции // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108.
5. Whiteside M., Herndon J.M. Unequivocal Detection of Solar Ultraviolet Radiation 250–300 nm (UV-C) at Earth's Surface // European Journal of Applied Sciences. 2023. Vol. 11. No. 2. P. 455–472. DOI: 10.14738/aivp.112.14429.
6. Startsev O.V., Kychkin A.K., Lebedev M.P., Polyakov V.V. Effects of moisture on aging of polymer composite materials in a cold climate // Procedia Structure Integration. 2020. Vol. 30. P. 162–166.

7. 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 // Климат–2023: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы: сб. докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф. (29 сент. 2023 г., г. Москва). М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. С. 131–153.
8. 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: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-136-154.
9. Мараховский П.С., Воробьев Н.Н., Гуляев А.И., Ткачук А.И. Влияние добавок полиарилсульфона на климатическую стойкость углепластика на эпоксидной основе // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2022. Т. 64. № 2. С. 113–119. DOI: 10.31857/S2308112022020080.
10. Гуляев А.И., Яковлев Н.О., Орешко Е.И. Фрактографические признаки роста межслоевой трещины при нагружении углепластика по различным модам // Труды ВИАМ. 2019. № 12 (84). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-99-108.
11. Гуляев А.И., Медведев П.Н., Сбитнева С.В., Петров А.А. Применение наноиндентирования для определения адгезионной прочности волокно-матрица в углепластиках // Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. (28 июня 2019 г., г. Москва). М.: ВИАМ, 2019. С. 240–253.
12. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
13. Steadman R.G. Norms of apparent temperature in Australia // Australian Meteorological Magazine. 1994. Vol. 43. P. 1–16.
14. De Gennes P.G., Brochard-Wyart F., Quéré D. Capillarity and Wetting Phenomena – Drops, Bubbles, Pearls, Waves / ed. A. Reisinger. Springer, 2002. 430 p.
15. Laptev A.B., Akhmyarov R.J., Lapteva A.A. et al. Distribution of chloride ions along the flight path of aircraft (Overview) // Journal of Physics. Conference Series. IOP Publishing Ltd, 2022. Vol. 2373. P. 22008. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022008.
16. Wenzel R.N. Resistance of solid surfaces to wetting by water // Industrial & Engineering Chemistry. 1936. Vol. 28. P. 988–994. DOI: 10.1021/IE50320A024.
17. Cassie A.B.D., Baxter S. Wettability of porous surfaces // Transactions of The Faraday Society. 1944. Vol. 40. P. 546–551. DOI: 10.1039/TF9444000546.
18. Crank J. The mathematics of diffusion. 2nd ed. Oxford, UK: Clarendon Press, 1975. 414 p.
19. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. 2-е изд. М.: Энергия, 1978. 480 с.
20. Weitsman Y.J. Composites in the sea: sorption, strength and fatigue // Twelfth Int. Con. on Composite Materials – ICCM'12: Extended abstracts. Paris, France: Instaprint S.A., 1999. P. 210.
21. Померанцев А.Л. Методы нелинейного регрессионного анализа для моделирования кинетики химических и физических процессов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2003. 304 с.
22. Кротов А.С. Диагностика процессов сорбции и диффузии влаги в полимерных композиционных материалах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Барнаул, 2002. 124 с.
23. Малкин А.Я., Чалых А.Е. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. М.: Химия, 1979. 351 с.
24. Lee S., Knaebel K.S. Effects of mechanical and chemical properties on transport in fluoropolymers. I. Transient sorption // Journal of applied polymer science. 1997. Vol. 64. P. 455–476.
25. Перехоженцев А.Г. Моделирование температурно-влажностных процессов в пористых строительных материалах. Часть 3. Расчет коэффициентов диффузии водяного пара в пористых материалах по характеристикам их пористой структуры // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 89–92.
26. Вигдергауз В.Е., Гольберг Г.Ю. Нанохимические аспекты флокуляции минеральных частиц: смачиваемость минералов и ее влияние на энергию гидрофобных взаимодействий в рамках расширенной теории ДЛФО // Нанотехнологии и охрана здоровья. 2011. Т. 3. № 7. С. 23–29.

27. Старцев В.О., Николаев Е.В., Варданыан А.М., Нечаев А.А. Влияние климатических воздействий на внутренние напряжения наномодифицированного цианэфирного углепластика // Труды ВИАМ. 2021. № 8 (102). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-104-112.

### References

1. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-70-80.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
4. Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V. Current trends in the development of testing materials for resistance to climatic factors (review). Part 2. Main trends. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108.
5. Whiteside M., Herndon J.M. Unequivocal Detection of Solar Ultraviolet Radiation 250–300 nm (UV-C) at Earth's Surface. *European Journal of Applied Sciences*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 455–472. DOI: 10.14738/aivp.112.14429.
6. Startsev O.V., Kychkin A.K., Lebedev M.P., Polyakov V.V. Effects of moisture on aging of polymer composite materials in a cold climate. *Procedia Structure Integration*, 2020, vol. 30, pp. 162–166.
7. Startsev V.O., Startsev O.V., Zeleneva T.O., Vardanyan A.M. The influence of precipitation on the change in the mass of polymer composite material samples under open climatic conditions. *Climate–2023: modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems*: collection of reports. VIII All-Rus. sc. and tech. conf. (September 29, 2023, Moscow). Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, pp. 131–153.
8. 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: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-136-154.
9. Marakhovsky P.S., Vorobyov N.N., Gulyaev A.I., Tkachuk A.I. Influence of polyarylsulfone additives on the climatic resistance of epoxy-based carbon fiber. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Ser. A*, 2022, vol. 64, no. 2, pp. 113–119. DOI: 10.31857/S2308112022020080.
10. Gulyaev A.I., Yakovlev N.O., Oreshko E.I. Fractography features of interlaminar crack growth in carbon fibre reinforced plastic under various mode loading. *Trudy VIAM*, 2019, no. 12 (84), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-99-108.
11. Gulyaev A.I., Medvedev P.N., Sbitneva S.V., Petrov A.A. Application of nanoindentation to determine the adhesion strength of fiber-matrix in carbon fiber reinforced plastics. *The role of fundamental research in the implementation of Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030*: Proc. V All-Rus. sc. and tech. conf. (June 28, 2019, Moscow). Moscow: VIAM, 2019, pp. 240–253.
12. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
13. Steadman R.G. Norms of apparent temperature in Australia. *Australian Meteorological Magazine*, 1994, vol. 43, pp. 1–16.
14. De Gennes P.G., Brochard-Wyart F., Quéré D. *Capillarity and Wetting Phenomena – Drops, Bubbles, Pearls, Waves*. Ed. A. Reisinger. Springer, 2002, 430 p.

15. Laptev A.B., Akhyyarov R.J., Lapteva A.A. et al. Distribution of chloride ions along the flight path of aircraft (Overview). *Journal of Physics. Conference Series*. IOP Publishing Ltd, 2022, vol. 2373, pp. 22008. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022008.
16. Wenzel R.N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, vol. 28, pp. 988–994. DOI: 10.1021/IE50320A024.
17. Cassie A.B.D., Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Transactions of The Faraday Society*, 1944, vol. 40, pp. 546–551. DOI: 10.1039/TF9444000546.
18. Crank J. *The mathematics of diffusion*. 2nd ed. Oxford, UK: Clarendon Press, 1975, 414 p.
19. Lykov A.V. *Heat and Mass Transfer: handbook*. 2nd ed. Moscow: Energiya, 1978, 480 p.
20. Weitsman Y.J. Composites in the sea: sorption, strength and fatigue. *Twelfth Int. Con. on Composite Materials – ICCM'12: Extended abstracts*. Paris, France: Instaprint S.A., 1999, pp. 210.
21. Pomerantsev A.L. *Methods of Nonlinear Regression Analysis for Modeling the Kinetics of Chemical and Physical Processes*: thesis, Doct. of Sc. (Phys. & Math.). Moscow, 2003, 304 p.
22. Krotov A.S. *Diagnostics of Moisture Sorption and Diffusion Processes in Polymer Composite Materials*: thesis, Cand. of Sc. (Phys. & Math.), Barnaul, 2002, 124 p.
23. Malkin A.Ya., Chalykh A.E. *Diffusion and viscosity of polymers. Measurement methods*. Moscow: Khimia, 1979, 351 p.
24. Lee S., Knaebel K.S. Effects of mechanical and chemical properties on transport in fluoropolymers. I. Transient sorption. *Journal of applied polymer science*, 1997, vol. 64, pp. 455–476.
25. Perekhozhentsev A.G. Modeling of Temperature-Humidity Processes in Porous Building Materials. Part 3. Calculation of Water Vapor Diffusion Coefficients in Porous Materials Based on the Characteristics of Their Porous Structure. *Stroitelnye materialy*, 2013, no. 2. pp. 89–92.
26. Vigdergauz V.E., Golberg G.Yu. Nanochemical Aspects of Mineral Particle Flocculation: Mineral Wettability and Its Effect on the Energy of Hydrophobic Interactions within the Extended DLVO Theory. *Nanotekhnologii i okhrana zdorovya*, 2011, vol. 3, no. 7, pp. 23–29.
27. Startsev V.O., Nikolaev E.V., Vardanyan A.M., Nechaev A.A. The influence of climatic factors on residual stresses in nanomodified cyanate ester-based CFRP. *Trudy VIAM*, 2021, no. 8 (102), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-104-112.

**Информация об авторах**

**Лаптев Анатолий Борисович**, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Матишов Геннадий Григорьевич**, научный руководитель ЮНЦ РАН, академик РАН, [ssc-ras@ssc-ras.ru](mailto:ssc-ras@ssc-ras.ru)

**Кривушина Анастасия Александровна**, старший научный сотрудник, к.б.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Павлов Михаил Рашитович**, ведущий научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Николаев Евгений Владимирович**, заместитель начальника Испытательного центра, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Anatoly B. Laptev**, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Gennady G. Matishov**, Scientific Adviser SSC of the RAS, Academician of the RAS, [ssc-ras@ssc-ras.ru](mailto:ssc-ras@ssc-ras.ru)

**Anastasia A. Krivushina**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Bio.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

**Evgeny V. Nikolaev**, Deputy Head of Testing Center, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.07.2025.  
The article was submitted 30.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 11.07.2025.