

Научная статья

УДК 620.1:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-112-120

## ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА СОДЕРЖАНИЕ ВЛАГИ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ В ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ

А.Б. Лаптев<sup>1</sup>, Г.Г. Матишов<sup>2</sup>, В.Р. Садков<sup>1</sup>, Е.В. Николаев<sup>1</sup>, А.М. Коган<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>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», Ростов-на-Дону, Россия; ssc-ras@ssc-ras.ru

**Аннотация.** Представлены расчетные зависимости изменения влагосодержания и температуры в объеме и на поверхности образца материала при воздействии ветра. Рассмотрен случай отсутствия свободной влаги на поверхности. Показано, что влияние ветра на влагосодержание заключается в воздействии на температуру поверхности за счет сил вязкого трения вблизи поверхности образца материала. При этом свободная влага в капиллярах испаряется с постоянной скоростью. Сорбированная влага в зависимости от градиента концентрации влаги, температуры и парциального давления влаги в объеме материала удаляется с уменьшающейся скоростью.

**Ключевые слова:** ветер, влажность, влагосодержание полимеров, климатические факторы, свободная влага, сорбированная влага, старение полимеров

**Для цитирования:** Лаптев А.Б., Матишов Г.Г., Садков В.Р., Николаев Е.В., Коган А.М. Влияние ветра на содержание влаги в полимерных композиционных материалах в природных условиях // Труды ВИАМ. 2025. № 5 (147). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-112-120.

Scientific article

## THE WIND EFFECT ON THE HUMIDITY OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN NATURAL CONDITIONS

A.B. Laptev<sup>1</sup>, G.G. Matishov<sup>2</sup>, V.R. Sadkov<sup>1</sup>, E.V. Nikolaev<sup>1</sup>, A.M. Kogan<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 state budgetary institution of science «Federal research centre Southern scientific centre of the Russian academy of science», Rostov-on-Don, Russia; ssc-ras@ssc-ras.ru

**Abstract.** The article considers the calculated dependencies of changes in the humidity and temperature in the volume and on the surface of a material sample under the influence of the wind. The study considers a case of the absence of free moisture on the surface. It is shown that the wind effect on the humidity of the surface is about affecting the surface temperature due to the viscous friction forces near the surface of the material sample. At the same time, free moisture in capillaries evaporates at a constant rate. Sorbed moisture, depending on the gradient of moisture concentration, temperature, and partial pressure of moisture in the bulk of the material, is removed at a decreasing rate.

**Keywords:** wind, humidity, moisture saturation of polymers, climatic factors, free moisture, sorbed moisture, polymer aging

*For citation:* Laptev A.B., Matishov G.G., Sadkov V.R., Nikolaev E.V., Kogan A.M. The wind effect on the humidity of polymer composite materials in natural conditions. *Trudy VIAM*, 2025, no. 5 (147), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-112-120.

### Введение

Исследование климатической стойкости полимеров и прогнозирование значений их служебных (расчетных) характеристик являются важным этапом как паспортизации материала, так и эксплуатации изготовленных из него деталей, узлов и агрегатов [1–3]. Многообразие климатических факторов, их уровней и сочетаний, ежегодное изменение климата требуют создания алгоритмов расчета сохраняемости свойств материалов для каждого возможного региона эксплуатации. Наиболее значимые факторы, такие как влажность, тепло, солнечная радиация, можно количественно оценить и измерить. Их воздействие на материалы можно спрогнозировать с достаточной точностью [4, 5]. Необходимо отметить, что влияние ветра на материал, скорость и направление которого можно измерить, неоднозначно. Необходима разработка методов расчета его воздействия.

В работе [6] описано влияние ветра на влажную поверхность образца материала при экспозиции на открытой площадке. Показано, что скорость ветра напрямую влияет на время удаления влаги с поверхности и за счет интенсификации испарения дополнительно снижает температуру поверхности. После удаления свободной влаги с поверхности происходит объемная сушка или увлажнение (при высокой влажности воздуха) материала. Вопросам сушки материалов (строительных, пищевых и др.) посвящено большое количество различных публикаций, представленных в обзоре [7]. Методология промышленной сушки лишь отчасти описывает изменения, происходящие в материале при воздействии ветра в реальных условиях.

Цель данной работы – рассмотрение термодинамических закономерностей изменения температуры и влагосодержания материала под воздействием воздушных масс (ветра), содержащих влагу.

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

### Материалы и методы

Процесс сушки материала при воздействии ветра зависит от большого количества факторов, связать которые в единую функциональную зависимость практически невозможно [8]. Неполный перечень включает следующие факторы:

- особенности химической структуры и физического состояния материала;
- форма полуфабриката, которая определяет длину пути влаги при высушивании;
- начальное и конечное влагосодержание;
- влажность и температура воздуха, скорость перемещения воздушной массы – ветра;
- характер и условия обтекания материала воздухом.

Зависимость средней за период измерения влажности материала отображается зависимостью в виде кривой сушки

$$u = f(\tau). \quad (1)$$

Скорость сушки можно определить как первую производную функции кривой сушки:

$$-\frac{\partial u}{\partial \tau} = f'(\tau) = f''(u). \quad (2)$$

Знак минус показывает, что количество влаги в материале при сушке уменьшается. Скорость сушки в реальных условиях непостоянна: в течение первых 2 сут происходит интенсивная сушка, далее процесс замедляется. В первый период сушки (0–2 сут) интенсивность диффузии влаги к поверхности превышает интенсивность испарения. Скорость сушки при этом лимитируется интенсивностью испарения влаги и определяется только температурой поверхности материала, его влагосодержанием и скоростью ветра над поверхностью. В течение второго периода сушки (2–11 сут) интенсивность сушки лимитируется диффузией влаги к поверхности из объема материала.

### **Тепломассоперенос во влажных материалах**

Сушка материалов, содержащих влагу, представляет собой последовательные процессы диффузии влаги к поверхности и ее испарения.

Уравнение, описывающее движение влаги из объема материала на его поверхность, имеет следующий вид:

$$q_m = -a_m \rho_c \nabla u - a_m \rho_c \delta_t \nabla t - K \nabla p, \quad (3)$$

где  $q_m$  – плотность потока массы, кг/(м<sup>2</sup>·ч);  $a_m$  – коэффициент влагопроводности, м<sup>2</sup>/ч;  $\rho_c$  – плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta_t$  – термоградиентный коэффициент, °C<sup>-1</sup>;  $K$  – коэффициент фильтрации, кг/(м·ч·Па);  $\nabla t = \partial t / \partial x$  – градиент температуры, °C/м;  $\nabla u = \partial u / \partial x$  – градиент влагосодержания, м<sup>-1</sup>;  $\nabla p = \partial p / \partial x$  – градиент давления, Па/м.

Знаки минус в уравнении (3) означают, что направление потока влаги противоположно положительному значению соответствующих градиентов.

Коэффициент  $a_m$  при диффузии капиллярной свободной влаги и постоянной температуре остается постоянным. Значение  $\delta_t$  уменьшается при увеличении температуры.

При расчетах влияния ветра на тепло- и влагоперенос внутри материала необходимо, прежде всего, установить градиенты – разность температур, влагосодержания и давления на поверхности и в объеме материала.

В работе [9] рассмотрен случай свободной конвекции (свободное движение потока воздуха в отсутствие ветра). Движение воздуха инициируется изменением плотности при изменении температуры и стремлением более нагретых объемов переместиться вверх.

Конвективный поток воздуха в пограничном слое у поверхности материала инициируется изменением температуры воздуха от  $t_b$  до  $t$ . Скорость конвективного потока максимальна в пограничном слое, а на удалении стремится к нулю.

При воздействии ветра со скоростью  $\omega$  слой нагретого в начале поверхности воздуха мал, и течение ламинарное. По мере перемещения нагретого потока воздуха вдоль поверхности толщина слоя увеличивается, слои начинают завихряться и течение становится турбулентным. Режим течения зависит от протяженности и угла наклона поверхности  $\gamma$  по отношению к вектору скорости ветра  $\omega$ .

Изучение интенсивности массо- и теплообмена в условиях конвекции позволило получить уравнения подобия, в которых в качестве определяющей принята температура воздушной массы над поверхностью  $t_b$  на высоте 0,5–2,0 м [10].

При перемещении воздуха со скоростью  $>0,5$  м/с непосредственно над поверхностью наблюдается выделение/поглощение тепловой энергии под действием внутреннего трения. Энергия изменяется из-за рассеивания и перехода в теплоту части механической энергии движения потока воздуха. Происходит так называемая диссипация энергии движения.

Теплота в основном выделяется в ближайшем к стенке слое воздуха, что приводит к локальному повышению температуры воздуха. В зависимости от теплопроводности поверхность образца нагревается. Температура поверхности при этом называется адиабатной ( $t_p$ ). Она устанавливается на поверхности при незначительном переносе теплоты через объем образца.

В случае, когда  $t \neq t_p$ , происходит теплообмен поверхности и воздуха. Если  $t > t_p$ , теплота передается от поверхности материала потоку воздуха, при  $t < t_p$  – от воздуха поверхности. Необходимо отметить, что в случае  $t > t_b$  происходит передача энергии диссипации из приграничного слоя от поверхности материала потоку воздуха.

Влияние потока воздуха на поверхность материала определяется в основном температурой  $t_p$ , которую можно вычислить по формуле

$$t_p = t_b + r \frac{\omega^2}{2c_p}, \quad (4)$$

где  $t_b$  – температура воздуха, расположенного на 0,5–2,0 м выше поверхности, °С;  $\omega$  – скорость потока, находящегося выше поверхности, м/с;  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);  $r$  – коэффициент восстановления температуры (характеризует интенсивность отвода диссипативной энергии от стенки в слой выше поверхности).

Из формулы (4) видно, что разность  $t_p$  и  $t_b$  пропорциональна  $\omega^2$  и существенна при скоростях потока  $>50$  м/с. При более низких скоростях разница составляет несколько градусов, что при оценке длительного климатического воздействия может оказаться существенным. При скоростях потока  $\omega > 100$  м/с разница между значениями  $t_p$  и  $t_b$  может достигать сотен градусов.

Для воздуха коэффициент  $r$  при направлении ветра, параллельном поверхности материала, имеет следующие значения: при ламинарном режиме течения воздуха вблизи поверхности  $r = 0,84 \pm 0,20$  [11], при турбулентном –  $r = 0,89 \pm 0,30$  [12]. Для деталей сложной формы коэффициент  $r$  определяется опытным путем [13–15].

При затормаживании потока воздуха в пристеночном слое кинетическая энергия потока  $\frac{\omega^2}{2}$  расходуется на повышение давления  $\frac{p_0}{\rho_0} - \frac{p}{\rho}$  и внутренней энергии воздуха  $c_b(t_p - t_b)$ :

$$\frac{\omega^2}{2} = \left( \frac{p_0}{\rho_0} - \frac{p}{\rho} \right) + c_b(t_p - t_b). \quad (5)$$

где  $p_0$  и  $p$  – давление,  $\rho_0$  и  $\rho$  – плотности воздуха на расстоянии 0,5–2,0 м от поверхности и на поверхности материала соответственно;  $c_b$  – функция изменения удельной теплоемкости воздуха от давления;  $t_p$  – температура торможения газового потока, при низкой теплопроводности материала равная адиабатной температуре поверхности.

В соответствии с термодинамическим равенством величина  $\frac{p}{\rho} + c_b t_b = H_b$  – энтальпия воздуха. В то же время справедливо соотношение  $H_b = c_p t_b$ , где  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении. Поэтому уравнение (5) с учетом угла наклона поверхности  $\gamma$  к вектору скорости  $\omega$  принимает вид:

$$\frac{\omega^2}{2} \sin \gamma = c_p (t_p - t_b)$$

или

$$t_p = t_b + \frac{\omega^2}{2c_p} \sin \gamma. \quad (6)$$

При вычислении разности температур в объеме и на поверхности материала  $t$  и  $t_p$  можно определить градиент температуры.

С использованием зависимостей, представленных в работе [16], можно вычислить/оценить изменение энергии системы «поверхность–воздух» при варьировании скорости ветра и температуры поверхности. Плотность потока влаги в материале пропорциональна градиенту абсолютного потенциала влажности  $\nabla\Omega$ :

$$q_m = a_m \nabla\Omega. \quad (7)$$

Для приближенных инженерных расчетов определение коэффициента влагопроводности материалов можно упростить. Если в сорбционной области в качестве определяющего процесса принять перенос парообразной влаги, а движением жидкой (пленочной) фазы влаги пренебречь, то коэффициент влагопроводности  $a_m$  можно определить по формуле

$$a_m = 13,24 \cdot 10^{-10} \mu, \quad (8)$$

где  $13,24 \cdot 10^{-10}$  – размерный коэффициент,  $\text{кг} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / (\text{мг} \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж}/\text{кг}))$ , определенный при температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и средней относительной влажности воздуха 0,8 (ГОСТ 25898–2020);  $\mu$  – коэффициент паропроницаемости материала,  $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$  при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Значения коэффициента паропроницаемости строительных материалов приведены в СП 23-101–2004, для полимерных композиционных материалов показатель должен быть определен в соответствии с данной методикой.

Между относительным парциальным давлением водяного пара в материале  $\frac{p_n}{p_s}$  и адсорбционным потенциалом Гиббса  $\Theta_\mu$  при данной температуре существует термодинамическое соотношение [17]:

$$\Theta_\mu = \frac{10^{-3} RT}{M} \ln \frac{p_n}{p_s}, \quad (9)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;  $T = t + 273,15$  – температура,  $\text{К}$ ;  $M$  – молярная масса адсорбата,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;  $p_n$  – парциальное давление водяного пара в материале,  $\text{Па}$ ;  $p_s$  – давление насыщенного водяного пара в объеме набегающего воздуха,  $\text{Па}$ .

Для удобства практического применения шкалы потенциала влажности можно изменить формулу (9), используя выражение для абсолютного потенциала влагопереноса, полученное А.Г. Перехоженцевым [18] на основе фундаментального адсорбционного уравнения Гиббса применительно к влажному материалу. В качестве определяющего параметра для этого потенциала принята величина  $1 - \frac{p_n}{p_s}$ . Влияние температуры

на величину потенциала можно исключить, приняв значение температуры, равным эталонной температуре ( $T = 293,15 \text{ К}$ ). С учетом этого при стандартных параметрах водяного пара ( $R = 8,31451 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ,  $M = 18,0153 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$ ) и эталонной температуре получена формула

$$\Omega = -135,3 \ln(1 - \varphi), \quad (10)$$

где  $\varphi = p_n/p_s$  – относительное парциальное давление водяного пара в материале при эталонной температуре.

Абсолютный потенциал влажности  $\Omega$ , определяемый по формуле (10), показывает изменение удельной энергии системы «влажный материал–воздух» при изменении

парциального давления водяного пара в материале по сравнению с давлением насыщенного водяного пара при эталонной температуре  $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  [19]. Определение абсолютного потенциала влажности  $\Omega$  исключает влияние вида материала и температуры, что полностью согласуется с идеей В.Н. Богословского, положенной в основу определения экспериментального потенциала влажности [20].

В работе [21] показано, что капиллярное давление (до предела капиллярной насыщенности) можно вычислить по относительной влажности воздуха в порах материала с помощью уравнения Кельвина

$$p_k = -\rho_w R_n T \ln \varphi, \quad (11)$$

где  $\rho_w$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $R_n$  – газовая постоянная водяного пара ( $461,5 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ );  $\varphi$  – относительная влажность воздуха.

С учетом полученных зависимостей уравнение (3) можно записать в виде:

$$q_m = a_m \Omega - a_m \rho_c \delta_i (t - t_p). \quad (12)$$

Влагосодержание материала при постоянной скорости сушки  $du/d\tau = \text{const}$  снижается по линейному закону [22]. Температура материала  $t$  в этом периоде сушки постоянна и равна температуре увлажненного термометра (при конвективной сушке с нулевой скоростью воздушного потока).

Продолжительность первого периода сушки рассчитывается по формуле

$$\tau_1 = \frac{u_0 - u_k}{q_m}, \quad (13)$$

где  $u_0$  – начальное влагосодержание;  $u_k$  – критическое влагосодержание;  $q_m = \frac{du}{d\tau}$  – скорость сушки в первом периоде.

Во втором периоде сушки температура материала увеличивается от температуры увлажненного термометра до температуры окружающего воздуха, а скорость сушки снижается с течением времени по степенной зависимости с показателем степени

$$\frac{du_2}{d\tau_2} = -q_m \left( \frac{u_p}{u_k} \right)^n, \quad (14)$$

где  $u_p$  – влагосодержание поверхностных слоев материала;  $q_m$  имеет положительный знак;  $n$  определяется в соответствии с данными работы [19].

Продолжительность второго периода сушки (при  $n = 1$ ) может быть описана уравнением

$$\tau_2 = -\frac{u_k}{q_m} \ln \left( \frac{u_p}{u_k} \right) = \frac{u_k}{q_m} \ln \left( \frac{u_k}{u_p} \right) \quad (15)$$

или при  $n \neq 1$

$$\tau_2 = -q_m^{-1} (u_k - u_p) \left( \frac{u_p}{u_k} \right)^n. \quad (16)$$

Общая продолжительность удаления капиллярной влаги из материалов представляет собой сумму продолжительностей периодов постоянной и уменьшающейся скорости сушки

$$\tau_c = \tau_1 + \tau_2. \quad (17)$$

### Заключения

Рассмотрено влияние ветра на материалы при положительной температуре воздуха, отсутствии атмосферных осадков и неизменных атмосферном давлении и солнечной радиации. Влияние ветра на влагосодержание заключается в воздействии на температуру поверхности за счет сил вязкого трения вблизи поверхности образца материала. При этом свободная влага в капиллярах испаряется достаточно быстро с постоянной скоростью  $q_m = \text{const}$ . Сорбированная влага в зависимости от градиента концентрации влаги, температуры и парциального давления влаги в объеме материала удаляется с уменьшающейся скоростью.

Для расчета скорости сушки материала предложено использовать известные зависимости, полученные и обоснованные такими учеными, как В.Н. Богословский, К.Ф. Фокин, Э.Х. Одельский, А.М. Шкловер, Ф.В. Ушков, В.М. Ильинский, М.В. Поликанов, и усовершенствованные А.Г. Перехоженцевым, Д.А. Андреевым, В.А. Могутовым и А.Н. Цирлиным, В.В. Козловым, Н.М. Künzle, Н. Glaser и др.

С использованием представленных зависимостей и последовательности расчета можно определить влагосодержание материала и температуру его поверхности с учетом скорости ветра и угла наклона поверхности к вектору скорости (направлению ветра) или при локальной оценке скорости ветра на поверхности образца.

*Работа выполнена 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: 10.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
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: 10.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
4. Вешкин Е.А., Старцев В.О., Постнов В.И., Баранников А.А. Климатические воздействия как оценка ремонтпригодности изделий из углепластика // *Труды ВИАМ*. 2019. № 8 (80). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-98-108.
5. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Зеленева Т.О. Источники светового излучения для имитации старения полимерных материалов под воздействием солнечной радиации // *Труды ВИАМ*. 2024. № 5 (135). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-71-82.
6. Старцев В.О., Нечаев А.А. Влияние натуральных и ускоренных климатических испытаний на прочность наномодифицированного углепластика // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-134-151.
7. 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.
8. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Изд. 7-е. М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит., 1985. 830 с.
9. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с.

10. Михеев М.А., Михеева И.М. Краткий курс теплопередачи. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 33–55.
11. Широков М.Ф. Физические основы газодинамики и применение ее к процессам теплообмена и трения. М.: Физматгиз, 1958. 340 с.
12. Eckert E., Weise W. Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche schnell angestromter unbeheizter Körper // *Forschung Im Ingenieurwesen*. 1942. Bd. 13. H. 6. S. 246–254.
13. Накорчевский А.И. Влияние климатических факторов на теплопередачу в верхней зоне грунтовых аккумуляторов теплоты // *Инженерно-физический журнал*. 2012. Т. 85. № 2. С. 392–407.
14. Храмов П.П., Пенязьков О.Г., Грищенко В.М. и др. Влияние барьерного разряда на аэродинамическое сопротивление профиля Жуковского при различных режимах обдува // *Инженерно-физический журнал*. 2011. Т. 84. № 6. С. 1252–1256.
15. Голуб О.В., Котов Г.В., Фисенко С.П. Моделирование формирования облака пара в ветровом потоке при интенсивном испарении // *Инженерно-физический журнал*. 2010. Т. 83. № 4. С. 757–762.
16. Корниенко С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций: дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград: ВолгГАСУ, 2018. 380 с.
17. Лыков А.В. Теплообмен: справочник. М.: Энергия, 1978. 480 с.
18. Перехоженцев А.Г. Вопросы теории и расчета влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций зданий. Волгоград: ВолгГАСА, 1997. 273 с.
19. Корниенко С.В. Потенциал влажности для определения влажностного состояния материалов наружных ограждений в неизотермических условиях // *Строительные материалы*. 2006. № 4. С. 88–89.
20. Богословский В.Н., Гагарин В.Г. Потенциал влажности. Теоретические основы // *Вестник отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительства*. 1996. Вып. 1. С. 12–14.
21. Künzle H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Stuttgart: IRB Verl., 1995. 540 p.
22. Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н., Громова Е.Н. Теплообменное оборудование предприятий (сушильные установки): учеб. пособие. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2016. 142 с.

#### 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, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
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 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
4. Veshkin E.A., Startsev V.O., Postnov V.I., Barannikov A.A. The climate impacts as the assessment of maintainability of products from carbon fiber. *Trudy VIAM*, 2019, no. 8 (80), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-98-108.
5. Laptev A.B., Pavlov M.R., Zeleneva T.O. Light sources for simulating the aging of polymer materials under the influence of solar radiation. *Trudy VIAM*, 2024, no. 5 (135), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-71-82.
6. Startsev V.O., Nechaev A.A. The influence of natural and accelerated weathering on the nanomodified CFRP'S strength. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-134-151.

7. 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.
8. Kasatkin A.G. *Basic processes and apparatus of chemical technology*. Ed. 7th. Moscow: State Sci.-tech. Chem. Publ. House, 1985, 830 p.
9. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Basics of Heat Transfer*. Ed. 2nd, stereotype. Moscow: Energiya, 1977, 344 p.
10. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *A short course in heat transfer*. Moscow: Publ. House of the USSR Academy of Sciences, 1960, pp. 33–55.
11. Shirokov M.F. *Physical foundations of gas dynamics and its application to heat transfer and friction processes*. Moscow: Fizmatgiz, 1958, 340 p.
12. Eckert E., Weise W. Messungen der Temoeraturverteilung auf der Oberfleche schnell angestromter unbeheizter Körper. *Forschung Im Ingenieurwesen*, 1942, bd. 13, h. 6, ss. 246–254.
13. Nakorchevsky A.I. Influence of climatic factors on heat transfer in the upper zone of ground heat accumulators. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 2012, vol. 85, no. 2, pp. 392–407.
14. Khramtsov P.P., Penyazkov O.G., Grishchenko V.M. et al. Influence of barrier discharge on the aerodynamic drag of Zhukovsky airfoil under different blowing conditions. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 2011, vol. 84, no. 6, pp. 1252–1256.
15. Golub O.V., Kotov G.V., Fisenko S.P. Modeling of vapor cloud formation in a wind flow with intense evaporation. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 757–762.
16. Kornienko S.V. *Increasing the energy efficiency of buildings by improving the methods for calculating the temperature and humidity conditions of enclosing structures*: thesis, Dr. Sc. (Tech). Volgograd: VolgGASU, 2018, 380 p.
17. Lykov A.V. *Heat and Mass Transfer: Handbook*. Moscow: Energiya, 1978, 480 p.
18. Perekhozhentsev A.G. *Issues of Theory and Calculation of the Humidity State of Heterogeneous Sections of Building Enclosing Structures*. Volgograd: VolgGASU, 1997, 273 p.
19. Kornienko S.V. Moisture potential for determining the moisture state of materials of external enclosures in non-isothermal conditions. *Stroitelnye materialy*, 2006, no. 4, pp. 88–89.
20. Bogoslovsky V.N., Gagarin V.G. Moisture potential. Theoretical foundations. *Vestnik otdeleniya stroitelnykh nauk Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitelstva*, 1996, is. 1, pp. 12–14.
21. Künzel H.M. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart: IRB Verlag, 1995, 540 p.
22. Lakomkin V.Yu., Smorodin S.N., Gromova E.N. *Heat and mass transfer equipment of enterprises (drying units)*: manual. St. Petersburg: VShTE SPbGUPTD, 2016, 142 p.

*Информация об авторах*

**Лаптев Анатолий Борисович**, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Матишов Геннадий Григорьевич**, заместитель президента РАН, научный руководитель ЮИЦ РАН, академик РАН, д.г.н., ФГБУН ФИЦ ЮИЦ РАН, ssc-ras@ssc-ras.ru

**Садков Вячеслав Романович**, магистрант, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

**Коган Алексей Маркович**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

*Information about the authors*

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

**Gennady G. Matishov**, Deputy President RAS, Scientific adviser of the SSC RAS, Academician RAS, Doctor of Sciences (Geogr.), FSBIS FRC SSC of the RAS, ssc-ras@ssc-ras.ru

**Vyacheslav R. Sadkov**, Master's Degree student, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

**Alexey M. Kogan**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.06.2024; получена после доработки 29.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.10.2024.  
The article was submitted 06.06.2024; received in revised form 29.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 29.10.2024.