

Научная статья

УДК 620.1:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-112-120

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА ТЕМПЕРАТУРУ И УВЛАЖНЕНИЕ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

А.Б. Лаптев¹, В.Р. Садков¹, Е.В. Николаев¹, Т.О. Зеленева¹

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

Аннотация. На основании известных термодинамических зависимостей выведены формулы для расчетов изменения температуры поверхности образца и времени испарения свободной влаги с поверхности материала при воздействии ветра. Расчеты позволяют с использованием метеоданных оценить реальное значение температуры образца и время до полного удаления свободной влаги с поверхности при низкой влажности воздуха или, наоборот, время увлажнения при высокой влажности при проведении климатических испытаний материалов. Использование выведенных теоретических зависимостей позволит учитывать влияние жидких осадков и ветра при прогнозировании климатической стойкости материалов.

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

Для цитирования: Лаптев А.Б., Садков В.Р., Николаев Е.В., Зеленева Т.О. Влияние ветра на температуру и увлажнение образцов материалов при климатических испытаниях // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-112-120.

Scientific article

EFFECT OF WIND ON TEMPERATURE AND MOISTURE CONTENT OF MATERIAL SAMPLES DURING CLIMATIC TESTS

A.B. Laptev¹, V.R. Sadkov¹, E.V. Nikolaev¹, T.O. Zeleneva¹

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

Abstract. Based on the known thermodynamic dependencies, formulas for calculating changes in the surface temperature of a sample and the evaporation time of free moisture from its surface under the influence of wind are derived. Calculations allow, using meteorological data, to estimate the actual value of the sample temperature and the time until complete removal of free moisture from the surface at low air humidity or, conversely, the humidification time at high humidity during climatic tests of materials. The use of the derived dependencies will allow us to take into account the influence of liquid precipitation and wind when predicting the climatic resistance of materials.

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

For citation: Laptev A.B., Sadkov V.R., Nikolaev E.V., Zeleneva T.O. Effect of wind on temperature and moisture content of material samples during climatic tests. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-112-120.

Введение

Создание новых материалов как инженерный процесс должно выполняться в соответствии с последними достижениями цифровых технологий. Так, проектирование технических изделий в настоящее время основано на использовании цифровых технологий (конструирование, прочностные расчеты, создание макетов и др.). При компьютерных расчетах для конструкционных материалов учитывается набор механических характеристик, для функциональных – служебные свойства. Наборы характеристик, как правило, представляют собой значения свойств для новых материалов без учета коррозии и старения под действием климатических факторов. Внешние воздействующие факторы в значительной степени изменяют свойства материалов. Без учета изменения расчетных характеристик в процессе эксплуатации могут возникнуть значительные ошибки при проектировании и определении ресурса эксплуатации материала.

Для корректировки расчетных значений характеристик проводятся климатические испытания материала как в свободном состоянии, так и с наложением периодических и постоянных механических нагрузок. В результате проведения испытаний можно получить значения характеристик материала после воздействия конкретного климата и сочетания факторов, характерных для данного региона. Учитывая, что эксплуатация транспортных средств, особенно воздушных судов, осуществляется в разных климатических зонах с переменной интенсивностью, сведений об изменении характеристик после климатических испытаний для расчетов недостаточно. Для расчетов изменения свойств материала под воздействием множества факторов в различных климатических зонах необходимо от дискретных значений климатической стойкости переходить к функциональным зависимостям варьирования служебных характеристик материала при воздействии климатических факторов и эксплуатационных нагрузок.

Авторами работ [1–4] и др. получены модели изменения характеристик материалов под действием влаги, температуры и солнечной радиации. С использованием разработанных подходов появляется возможность создания функциональных моделей изменения свойств материала при различных сочетаниях и уровнях действующих факторов. Тем не менее эти три фактора не отражают всего многообразия внешних воздействий.

Как правило, при оценке климатического воздействия из-за сложности и неоднозначности влияния в расчетах не учитываются ветер, осадки (дождь, град, снег, выпадающая роса), переход температуры через нулевое значение, совместное влияние увлажнения и низких температур, которые приводят к ускоренному разрушению пористых материалов во влажном климате. Ветер является наименее изученным фактором [5, 6]. Необходимо отметить, что движение воздушных масс над/под поверхностью материала вызывает значительное ускорение процессов сорбции/десорбции влаги и химически агрессивных ионов, приводит к абразивному износу, влияет на количество скапливающегося снега, его неравномерное распределение на открытой поверхности и в застойных зонах. Ветер воздействует на материал не индивидуально, а в совокупности с другими климатическими факторами. Сухой ветер высушивает поверхность, влажный – может увеличить увлажнение. Горячий поток ветра может вызвать интенсивное старение, холодный, наоборот, – замедляет этот процесс.

При наличии ветра значительно изменяется динамика процесса «влажнонасыщение–сушка» материалов. При интенсивной сушке и испарении избыточной влаги под действием ветра изменяется температура поверхности материала: чем больше влаги и активнее испарение, тем значительно снижается температура поверхности.

Поскольку влажнонасыщение обуславливает изменение прочности и старение полимерных композиционных материалов, ветер влияет на сохраняемость свойств. Следовательно, оценка воздушных потоков необходима для понимания процессов, происходящих в полимерном композиционном материале при эксплуатации под воздействием климатических факторов.

Направление, влажность и температура ветра (изменение этих параметров по отношению к стационарным условиям) не учитываются. Единственной областью инженерных исследований ветра является архитектура. Здания и сооружения возводятся с учетом розы ветров, изменений температуры и давления ветра между строениями для обеспечения, с одной стороны, проветривания междомового пространства, с другой – для снижения наносов снега, скорости ветра в промежутках между конструкциями и комфортного пребывания людей [7].

Цель данной работы – определить основные закономерности влияния ветра на влагонасыщение и температуру поверхности образца материала.

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

Материалы и методы

В данной работе использованы известные зависимости изменения энергетических характеристик системы «материал–окружающая среда» [8–10].

Важнейшим законом термодинамики является закон сохранения энергии, который гласит, что тепло Q , поступающее в систему извне, используется для увеличения ее внутренней энергии U и выполнения работы A против внешних воздействий. Этот закон в дифференциальной форме описывается уравнением

$$dU = dQ - dA. \quad (1)$$

Внутренняя энергия материала зависит от его энергетических характеристик, а также их изменения в результате химических и физических процессов. Изменение энтропии S определяет количество энергии, получаемой системой при данной температуре T , согласно уравнению

$$dQ = TdS. \quad (2)$$

Работа A выполняется под действием внешних сил, таких как механические, электрические, гравитационные или химические, и рассчитывается с использованием уравнения

$$\delta A = \sum_{i=1}^n X_i dx_i, \quad (3)$$

где X_i – воздействие каждого фактора i из n ; x_i – координаты точки действия факторов X_i .

В качестве факторов учитываются давление P_i , внутренние и внешние напряжения, прилагаемые нагрузки σ_i и факторы климата: влажность φ_i , температура T_i , солнечная радиация R_i , ветер со скоростью v (ветер, кроме того, характеризуется направлением \vec{V} , температурой T_v , влажностью φ_v , содержанием твердых частиц C_T и др.) и т. д.; в качестве обобщенных координат – объем V_i , радиус r_i и т. д.:

$$dU = TdS - \sigma dV. \quad (4)$$

Процессы, происходящие на поверхности и в объеме полимерного материала, зависят от параметров, определяющих состояние системы «материал–окружающая среда» (энтропия или температура, давление или объем) [11].

Воздействие потока воздуха наиболее полно описывают при расчетах воздушных теплообменников. При этом поток воздуха (ветер) характеризуется скоростью, температурой и влажностью. Влияние влажности особенно важно, так как этот параметр постоянно изменяется и во многом определяет способность потока воздуха осушать или насыщать влагой полимерный композиционный материал [12, 13].

Теплосодержание материала (энтальпия H термодинамической системы) определяется по формуле [14]

$$H \equiv U + PV, \quad (5)$$

где P – давление, Па.

Формула расчета точки росы

Определение точки росы необходимо для оценки возможности увлажнения или высыхания поверхности. Температуру точки росы t_p в зависимости от температуры t_b и относительной влажности φ воздуха рассчитывают по формуле [15]

$$t_p = \frac{a\chi}{b - \chi}, \quad (6)$$

$$\chi = \frac{237,7t_b}{17,27 + t_b} + \ln\left(\frac{\varphi}{100}\right), \quad (7)$$

где $a = 17,27$; $b = 237,7$.

При $t_p < t_b$ происходит выпадение влаги воздуха на поверхности материала, при $t_p > t_b$ поверхность высыхает.

Расчет изменения температуры влажной поверхности при ветре

При штилевом ветре (скорость $< 0,5$ м/с) температура поверхности изменяется в зависимости от скорости конвективного испарения и теплопроводности материала. Далее не учитывается лучистое воздействие источников тепла и нагревания под действием солнечной радиации. Температура увлажненной поверхности как металлического, так и полимерного материала равна температуре увлажненного термометра. В соответствии с работой [16] можно определить разницу температур воздуха и увлажненной поверхности образца материала.

Для расчета температуры образца материала при охлаждении в результате испарения влаги необходимо иметь данные о значениях влажности и температуры воздуха. Водяной пар входит в состав сложной газовой смеси и равномерно распределен во всем объеме влажного газа. Доля водяного пара в газовой смеси, соответствующая 100%-ной влажности, равна доле плотности пара $\rho_{п.п}$ при температуре t_b и парциальном давлении $P_{п.п}$. Тогда относительная влажность φ составляет:

$$\frac{P_{п.п}}{\rho_{п.п}} \cdot 100 \% = \frac{P_{п.п}}{P_b} \cdot 100 \%, \quad (8)$$

где P_b – давление насыщенного водяного пара при t_b , Па; $\rho_{п.п}$ – плотность насыщенного пара.

Относительная влажность воздуха, движущегося со скоростью ω , рассчитывается с поправкой:

$$\frac{P_{п.п}}{P_b} = \frac{P_m - B(t_b - t_m)\Pi}{P_b}, \quad (9)$$

где t_m – температура увлажненного термометра, °С; $P_{п.п}$ – парциальное давление водяного пара в потоке воздуха, Па; P_m – давление насыщенного водяного пара при t_m , Па; Π – барометрическое давление, Па; B – коэффициент, зависящий от скорости ветра.

При $\omega > 0,5$ м/с коэффициент B рассчитывается по формуле

$$B = 0,00001 \cdot 65 \cdot \frac{6,75}{\omega} = \frac{0,00439}{\omega}. \quad (10)$$

Влагосодержание воздуха δ – количество водяного пара (кг) в 1 кг сухого воздуха:

$$\delta = 0,622 \frac{\varphi P_s}{\Pi - \varphi P_s}, \quad (11)$$

где P_s – давление сухого воздуха, Па.

Теплосодержание (энтальпия) паровоздушной смеси, отнесенное к 1 кг сухого воздуха [17]:

$$H_B = (C_{с.в} + C_{п})t_B + R_0\delta, \quad (12)$$

где H_B – энтальпия воздуха, Дж; $C_{с.в}$ – средняя удельная теплоемкость сухого воздуха, Дж/(кг·К); $C_{п}$ – удельная теплоемкость водяного пара, Дж/(кг·К); R_0 – удельная теплота парообразования воды при температуре t_B , Дж/кг.

Плотность влажного воздуха ρ_B при давлении Π и температуре $T = 273 + t_B$ определяется по уравнению

$$\rho_B = \rho_s + \rho_{п}, \quad (13)$$

в котором плотность сухого воздуха ρ_s и плотность водяного пара $\rho_{п}$ указываются при своем парциальном давлении

$$\rho_B = \frac{3,48 \cdot 10^{-3}}{T} (\Pi - 0,378\phi P_s). \quad (14)$$

Основные характеристики влажного воздуха (H_B , δ , t_m) можно определить по диаграмме «энтальпия–влажность», разработанной Л.К. Рамзиным [18].

Минимальной температурой влажной поверхности материала является t_m – температура увлажненного термометра. Следовательно, по значению t_m можно однозначно определить энтальпию и влажность воздуха [19]. В этом случае температуру поверхности можно рассчитать по формуле, полученной из выражения (9):

$$t = t_m + \frac{P_m - P_B}{BP}. \quad (15)$$

Расчет времени высыхания влажной поверхности при ветре

Различные варианты расчета достаточно давно используются в гидрологии [20]. Однако они адаптированы для нужд данной области и несколько отличаются от первоначальной зависимости, выведенной Далтоном [21], которая преобразована в работах [22, 23]. В соответствии с ней масса воды, испаряющейся с поверхности образца за 1 ч, определяется по формуле

$$G' = \frac{Fc(p_n - p_B)760}{\Pi}, \quad (16)$$

где F – площадь образца, м²; c – поправочный коэффициент, зависящий от давления потока и скорости движения воздуха над водяной поверхностью (при движении воздуха вдоль смоченной поверхности $c = 0,02 + 0,016\omega$, где ω – скорость движения воздуха, м/с); p_n – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре воды, мм рт. ст.; p_B – парциальное давление водяных паров в воздухе помещения, мм рт. ст.; Π – барометрическое давление, мм рт. ст.

Для поверхности образца важно не только определить скорость испарения, но и оценить время высыхания путем интегрирования и преобразования формулы (16):

$$G = \frac{Fc(p_n - p_B)760}{\Pi\tau}. \quad (17)$$

Время до высыхания образца можно вычислить по формуле

$$\tau = \frac{Fc(p_n - p_B)760}{\Pi G}. \quad (18)$$

Высота слоя воды на плоской гладкой гидрофобной поверхности [24] будет определяться по формуле

$$h = \sqrt{\frac{2\gamma(1 - \cos\theta)}{g\rho_{\text{ж}}}}, \quad (19)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; γ – поверхностное натяжение жидкости; θ – угол наклона образца, который находится в диапазоне от 0 до $\pi/2$.

Область применения предлагаемой формулы (19) ограничена начальным временным отрезком экспозиции гладких образцов – до значимого проявления эрозии полимерной матрицы или коррозии металла. Для шероховатых и неровных поверхностей высоту слоя воды можно определить экспериментально.

Максимальная масса воды на образце наблюдается после выпадения осадков или росы и может быть вычислена по формуле

$$G = F\rho_{\text{ж}}h. \quad (20)$$

В течение всего времени τ температура поверхности образца будет равна $t_p < t_b$. Температурное старение неметаллов и скорость электрохимической коррозии металлов будут замедленными.

Изменение энергии поверхности образца при высыхании свободной влаги можно оценить по потере тепла:

$$\Delta H_{\omega} = Q_{\omega} - Q_{\text{потерь}} = C_{\text{п}}(t - t_{\text{в.п}}) - Q_{\text{потерь}}, \quad (21)$$

где Q_{ω} – потери тепла с удаляемой влагой, Дж; $Q_{\text{потерь}}$ – поток тепла через стенки образца в окружающую среду, Дж; $C_{\text{п}}$ – теплоемкость материала, Дж/К; t и $t_{\text{в.п}}$ – температура на данный момент и полностью влажной поверхности.

Согласно уравнению теплоотдачи, поток тепла через стенки образца в окружающую среду (воздух) определяется по формуле

$$Q_{\text{потерь}} = \alpha_{\text{ст}}F_{\text{ст}}(T_{\text{ст}} - T_{\text{в}}), \quad (22)$$

где $\alpha_{\text{ст}}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи в окружающую среду лучеиспусканием и конвекцией, Вт/(м²·К); $F_{\text{ст}}$ – площадь поверхности образца, через которую теряется тепло в окружающую среду, м²; $T_{\text{ст}}$ – средняя температура поверхности образца, К; $T_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, К.

В инженерных расчетах коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{ст}}$ определяют по эмпирической зависимости

$$\alpha_{\text{ст}} = 9,3 + 0,058(T_{\text{ст}} - T_{\text{в}}). \quad (23)$$

Заключения

На основании проведенного анализа представлена формула расчета температуры точки росы для оценки возможности/невозможности выпадения влаги на поверхности материала. Выведены формулы для расчета изменения температуры поверхности образца и времени его высыхания (испарения свободной влаги). Получена формула для расчета количества (высоты слоя) влаги на поверхности образца после выпадения жидких осадков.

В соответствии с приведенными формулами на основании метеоданных можно определить в любой момент температуру и время до высыхания образца при низкой влажности воздуха или, наоборот, время увлажнения при высокой влажности. Можно определить граничные условия (т. е. параметры, при которых происходят увлажнение образца, диффузия влаги в объем образца или воздействие коррозионных процессов), время удаления свободной влаги в процессе сушки влажной поверхности и момент начала диффузии влаги из образца в атмосферу или перехода коррозионного процесса от электрохимического к химическому.

Определен вклад ветра в энергетический баланс образца материала в условиях испарения с его поверхности свободной влаги при климатическом воздействии, что позволит увеличить точность прогнозирования сохраняемости свойств полимерных композиционных материалов и скорости коррозии металлов.

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., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов: учеб. пособие. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
4. 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 (104). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
5. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 1. Испытания новых материалов // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1 (95). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
6. 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/ajvr.112.14429.
7. Мягков М.С. Климатический анализ в архитектурном проектировании: учеб.-метод. пособие. М.: МАРХИ, 2016. 118 с.
8. 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.
9. Бабич В.Ф., Брык М.Т., Веселовский Р.А. и др. Физикохимия многокомпонентных полимерных систем: в 2 т. / под общ. ред. Ю.С. Липатова. Киев: Наукова думка, 1986. Т. 2: Полимерные смеси и сплавы. 376 с.
10. Лебедев Е.В., Липатов Ю.С., Росовицкий В.Ф. и др. Физикохимия многокомпонентных полимерных систем: в 2 т. / под общ. ред. Ю.С. Липатова. Киев: Наукова думка, 1986. Т. 1: Наполненные полимеры. 384 с.
11. Бертенев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров / под ред. А.М. Ельяшевича. Л.: Химия, 1990. 432 с.
12. Энтальпия // *Большая российская энциклопедия*: в 35 т. М.: Большая российская энциклопедия, 2017. Т. 35. С. 348.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика: в 4 ч. 5-е изд. М.: Физматлит, 2002. Ч. 1. 616 с.
14. Горшков В.И., Кузнецов И.А. Основы физической химии. 3-е изд. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. 408 с.
15. Steadman R.G. Norms of apparent temperature in Australia // *Meteorological Magazine*. 1994. Vol. 43. P. 1–16.
16. Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н., Громова Е.Н. Тепломассообменное оборудование предприятий (сушильные установки): учеб. пособие. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2016. 142 с.
17. Лаптев А.Г., Дремичева Е.С., Сафина Г.Г. Расчет процесса испарительного охлаждения воды в открытых оборотных циклах: практикум. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. 28 с.
18. Гунич С.В., Янчуковская Е.В. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ химико-технологических процессов: примеры и задачи: в 2 т. Иркутск: Иркутск. гос. техн. ун-т, 2010. Т. 1. 215 с.

19. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов: в 2 ч. М.: Химия, 1995. Ч. 2: Массообменные процессы и аппараты. 635 с.
20. Методика расчета водохозяйственных балансов водных объектов // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. 2008. № 16. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-mpr-rf-ot-30112007-n-314/metodika-rascheta-vodokhoziaistvennykh-balansov-vodnykh/?ysclid=lw4sxyifv7662570439> (дата обращения: 13.05.2024).
21. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 450 с.
22. Полосин И.И., Новосельцев Б.П., Шершнева В.Н. Теоретические основы создания микроклимата в помещении. Воронеж, 2005. 143 с.
23. Строительная климатология: СНиП 23-01-99: утв. М-вом стр-ва и жилищно-коммунального хоз-ва Рос. Федерации 24.12.2020: ввод. в действие с 25.06.2021. М.: Стандартинформ, 2021. 146 с.
24. Gennes P.G., Wyart F.B., Quéré D. Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves // *Physics Today*. 2004. No. 57. P. 12–66. DOI: 10.1063/1.1878340.

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., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials: textbook*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
3. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
4. 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: November 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
5. Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V. Current trends in the development of testing materials for resistance to climate factors (review). Part 1. Testing of new materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
6. 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.
7. Myagkov M.S. *Climate analysis in architectural design: textbook*. Moscow: MARCHI, 2016, 118 p.
8. 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.
9. Babich V.F., Bryk M.T., Veselovsky R.A. et al. *Physicochemistry of multicomponent polymer systems: in 2 vols*. Ed. Yu.S. Lipatov. Kyiv: Naukova Dumka, 1986, vol. 2: Polymer mixtures and alloys, 376 p.
10. Lebedev E.V., Lipatov Yu.S., Rosovitsky V.F. et al. *Physicochemistry of multicomponent polymer systems: in 2 vols*. Ed. Yu.S. Lipatov. Kyiv: Naukova Dumka, 1986, vol. 1: Filled polymers, 384 p.
11. Bertenev G.M., Frenkel S.Ya. *Physics of polymers*. Ed. A.M. Elyashevich. Leningrad: Khimiya, 1990, 432 p.
12. Enthalpy. *The Great Russian Encyclopedia: in 35 vol*. Moscow: The Great Russian Encyclopedia, 2017, vol. 35, p. 348.
13. Landau L.D., Lifshits E.M. *Statistical Physics: in 4 parts*. 5th ed. Moscow: Fizmatlit, 2002, part 1, 616 p.

14. Gorshkov V.I., Kuznetsov I.A. *Fundamentals of Physical Chemistry*. 3rd ed. Moscow: Binom. Laboratoriya Znaniy, 2009, 408 p.
15. Steadman R.G. Norms of apparent temperature in Australia. *Meteorological Magazine*, 1994, vol. 43, pp. 1–16.
16. Lakomkin V.Yu., Smorodin S.N., Gromova E.N. *Heat and mass transfer equipment of enterprises (drying units): textbook*. St. Petesburg: VShTE SPbGUPTD, 2016, 142 p.
17. Laptev A.G., Dremicheva E.S., Safina G.G. *Calculation of the process of evaporative cooling of water in open circulation cycles: practical course*. Kazan: Kazan State Power Engineering Univ., 2018, 28 p.
18. Gunich S.V., Yanchukovskaya E.V. *Mathematical modeling and computer calculation of chemical-engineering processes: examples and problems: in 2 vols*. Irkutsk: Irkutsk State Tech. Univ., 2010, vol. 1, 215 p.
19. Dytnersky Yu.I. *Processes and apparatuses of chemical engineering: textbook for universities: in 2 parts*. Moscow: Khimiya, 1995, part 2: Mass transfer processes and apparatuses, 635 p.
20. *Methodology for calculating water management balances of water bodies*. Available at: <https://sudact.ru/law/prikaz-mpr-rf-ot-30112007-n-314/metodika-rascheta-vodokhoziaistvennykh-balansov-vodnykh/?ysclid=lw4sxyifv7662570439> (accessed: May 13, 2024).
21. *Physical quantities: handbook*. Ed. I.S. Grigorieva, E.Z. Meilikhova. M.: Energoatomizdat, 1991, 450 p.
22. Polosin I.I., Novoseltsev B.P., Shershnev V.N. *Theoretical foundations of creating a microclimate in a room*. Voronezh, 2005, 143 p.
23. *Construction climatology: Building codes and regulations 23-01–99: approved by the Ministry of Construction and Housing Communal Services of the Rus. Federation. 24.12.2020: comes into effect from 25.06.2021*. Moscow: Standartinform, 2021, 146 p.
24. Gennes P.G., Wyart F.B., Quéré D. Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves. *Physics Today*, 2004, no. 57, pp. 12–66. DOI: 10.1063/1.1878340.

Информация об авторах

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

Зеленева Татьяна Олеговна, техник, 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

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

Tatiana O. Zeleneva, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.07.2024; получена после доработки 28.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.10.2024.
The article was submitted 11.07.2024; received in revised form 28.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 28.10.2024.