

Металлургия и материаловедение Metallurgy and Materials

Обзорная статья

УДК 67.017

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28102>

*Е.Д. Васильева*¹ ✉, *А.А. Васильева*², *А.К. Кычкин*²

¹ Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН»,
г. Якутск, Россия;

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.Р. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Россия

✉ vasilyeva_edm@mail.ru

К ВОПРОСУ О МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЛАГИ НА ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Аннотация. Интерес в области изучения влияния воздействия влаги на свойства полимерных композиционных материалов не иссякает и по сей день. Негативное воздействие влаги на прочностные и эксплуатационные свойства является тем фактором, прогноз которого необходим для обеспечения надежности и продолжительности эксплуатации полимерных композиционных материалов. В данном обзоре рассматриваются методы определения поглощения и диффузии влаги в полимерных материалах с волокнистыми (ткаными) наполнителями на основе эпоксидной смолы, действующие отечественные и зарубежные нормативы определения влагосодержания в полимерных композиционных материалах, методы определения и оценки воздействия поглощенной влаги на полимерные композиционные материалы, включая условия эксплуатации и производственные процессы (состояние отверждения). Кратко приведены данные по влиянию климатических факторов на полимерные композиционные материалы за последние пару лет. Обзор будет полезен для исследователей, занимающихся проблемой влагопоглощения и водопоглощения композиционными материалами в виде обобщения накопленных знаний по данной проблематике в целях анализа поведения полимерных материалов в долгосрочный период.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, влага, вода, сорбция, поглощение, диффузия, климатические испытания, нормативная документация.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №0297-2021-0041.

Для цитирования:

Васильева Е.Д., Васильева А.А., Кычкин А.К. К вопросу о методах исследования воздействия влаги на полимерные композиционные материалы // *Материаловедение. Энергетика.* 2022. Т. 28, № 1. С. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28102>

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Overview article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28102>

*E.D. Vasilyeva*¹ ✉, *A.A. Vasilyeva*², *A.A. Kychkin*²

¹ Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia;

² V.P. Laronov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

✉ vasilyeva_edm@mail.ru

ON THE METHODS OF STUDYING THE IMPACT OF MOISTURE ON POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

Abstract. The study of the influence of moisture on the properties of polymer composite materials has been drawing attention to this day. The negative impact of moisture on the strength and performance properties is the factor, the forecast of which is necessary to ensure the reliability and durability of polymer composite materials. This review considers methods for determining moisture absorption and diffusion in polymer materials with fibrous (woven) fillers based on epoxy resin; current domestic and foreign standards for determining moisture content in polymer composite materials; methods for determining and assessing the effect of absorbed moisture on polymeric composite materials, including conditions of operation and manufacturing processes (curing state). The data on the influence of climatic factors on polymer composite materials for the last couple of years are briefly presented. The review will be useful for researchers dealing with the problem of moisture absorption and water absorption by composite materials in the form of a generalization of the accumulated knowledge on this topic in order to analyze the long-term behavior of polymer materials.

Keywords: polymer composite materials, moisture, water, sorption, absorption, diffusion, climatic tests, regulatory documentation.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 0297-2021-0041.

Citation:

E.D. Vasilyeva, A.A. Vasilyeva, A.A. Kychkin, On the methods of studying the impact of moisture on polymeric composite materials, *Materials Science. Power Engineering*, 28 (01) (2022) 21–31, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28102>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в различных областях производства ввиду своих физических, химических, технологических и служебных свойств [1–3]. Преимущество ПКМ заключается в вариативности и возможности улучшать отдельные показатели ранее изученных ПКМ. К недостаткам ПКМ можно отнести снижение прочностных характеристик, происходящих в результате физико-химических процессов, протекающих в полимерной матрице (усадка, деструкция, расслоение, пористость) и в межфазном слое полимер-наполнитель (разрыв связи, непрочность, расслоение, разрыв волокна). Степень изменения прочностных показателей зачастую зависит от вида и содержания связующего и наполнителя, технологии получения ПКМ [4] и т.д.

Среди большинства факторов отрицательно влияющих на конструкционные показатели ПКМ при длительном воздействии особо выделяется влияние влаги, запускающее процесс деградации полимерных систем. Впитанная полимерным композитом влага вызывает ряд проблем, таких как

изменение теплофизических, механических и химических характеристик полимерной матрицы в результате пластификации, гидролиза, набухания, разрыва связей, расслоения и т.д.

Значительная часть исследований по определению влияния влаги на прочностные характеристики ПКМ посвящена воздействию атмосферной влаги, иначе называемом изучением влагонасыщения или влагопоглощения. Однако влага в ПКМ может проникать и при непосредственном контакте с поверхностью материала. Такие испытания проводят путем погружения образцов в воду (водопоглощение) до достижения исследуемым образцом равновесного состояния.

Целью данной работы является обзор основных методов исследования воздействия влаги на ПКМ, определение показателей, которым характерно изменение величины под воздействием поглощенной влаги, а также обобщение существующих методик и нормативных документов по определению влагосодержания.

В обзоре Duncan и Broughton [5] процесс проникновения химических веществ через полимеры представляют в виде комбинации двух взаимосвязанных процессов: растворение в полимере, диффузия через полимер. Под растворением авторы понимают процесс поглощения воды в полимер, зависящий от энергии взаимодействия полимера к поглощаемым молекулам воды, доступной удельной поверхности полимера и концентрации поглощаемой воды. Процесс массопереноса (иначе диффузии влаги) в ПКМ предлагается связывать с характеристиками волокнистого материала, объемной доли и ориентации волокон в ПКМ [6]. Под градиентом концентрации, при котором поглощенные молекулы воды транспортируются внутри полимера, понимается диффузия влаги в полимер, а диффузионные свойства определяются посредством коэффициента диффузии. Значительную долю начального поглощения влаги авторы связывают с капиллярным действием вдоль волокон или границ раздела полимер-наполнитель. Основной причиной, способствующей капиллярному эффекту, авторы рассматривают технологические дефекты при получении ПКМ, а именно с усадкой смолы вдали от волокон во время процесса отверждения. Для описания закономерности диффузии влаги в полимер используется закон диффузии Фика, основанный на аналогии между диффузией и теплопроводностью, предложенной Фурье и Омом. Предпочтение модели Фика связано с возможностью подобрать модельное уравнение к экспериментальным данным сорбции. Однако для более длительных периодов испытаний данная модель не удовлетворяет требованию допустимой погрешности для описания процесса поглощения влаги в полимер, что вызывает необходимость разработки новых моделей для адекватного описания и прогнозирования диффузии влаги в полимер.

Положительное воздействие влаги на прочность в углепластиках в работе [7] при повышенной температуре авторы объясняют пластифицирующим действием сорбированной влаги в эпоксидной матрице, которая приводит к релаксации внутренних напряжений в объеме углепластика. Равномерный прирост массы сорбированной влаги приостанавливается по достижению равновесного влагосодержания за 30 дней. В работе рассмотрено влияние аппрета на влагопоглощение и водопоглощение. После удаления излишка аппрета с наполнителя в углепластиках повысилась плотность и снизилась пористость, что стало причиной снижения водопоглощения в 1,5 раза и влагопоглощения в 2,6 раза.

Пластифицирующее влияние влаги на ПКМ подтверждают работы [8, 9, 20, 22, 24, 27]. В первом исследовании сравнивали пределы прочности при изгибе ГОСТ 25.604-82, сжатии ГОСТ 25.602-80 и сдвиге EN 2563 и температуры расстекловывания ASTM E 228-85 при минимальном и максимальном равновесном влагосодержании. При максимальном равновесном влагосодержании больше всего уменьшается относительная прочность при изгибе, в меньшей степени относительные прочности при сжатии и сдвиге. При этом после высушивания образцов прочностные характеристики восстанавливались до 100 %, что является доказательством обратимого эффекта воздействия влаги, подробно описанных в работах [10, 20, 24]. Температура расстекловывания

при максимальном равновесном влагосодержании расширяется и после высушивания образца сужается и смещается в зону более высоких температур.

В настоящее время в основном существует три вида анализа для получения результатов, связанных с кинетикой поглощения влаги в пористых материалах: аналитический, численный и экспериментальный. Недостаток проведения экспериментов по влагопоглощению в лаборатории состоит в том, что результаты зависят от заранее определенных условий эксплуатации. Как правило, процесс влагопоглощения происходит очень медленно, поэтому материалу требуется длительная экспозиция для достижения состояния влагонасыщения. Аналитические методы ограничены задачами, гипотезы которых упрощены и применяются простой геометрии, что ограничивает использование. С другой стороны, численные методы практически не ограничены, могут использоваться в более сложных задачах с граничными условиями, заданными в произвольной геометрии [10–19].

Модель Ленгмюра описывает такой механизм, когда одна молекула воды может свободно перемещаться в объеме полимера, в то время как остальная часть молекул воды связывается с полимерной матрицей композита. При этом свободная молекула воды может стать «связанной» молекулой, а связанная молекула воды может стать свободной. Такой эффект может быть рассчитан с использованием двух дополнительных параметров: λ – вероятностью захвата свободной молекулы воды и μ – вероятностью того, что захваченная молекула станет свободной. Таким образом, эта модель включает параметры молекулярного взаимодействия воды и полимера (свободного и связанного состояния молекул воды), а также дает описание процесса динамического обмена между двумя фазами. Следовательно, модель Ленгмюра является улучшенной версией диффузионной модели Фика, известная как аномальная модель или нефиковская модель диффузии влаги.

При изучении структурных изменений в ПКМ, вызванных воздействием влаги, широко используются следующие методы: термомеханический анализ (ТМА), динамический механический анализ (ДМА), термогравиметрический (ТГА), дифференциально сканирующая калориметрия (ДСК), инфракрасная спектроскопия (ИК-спектроскопия), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), растровая электронная микроскопия (РЭМ), акустический метод.

Вышеперечисленные работы направлены на изучение диффузии влаги в полимер в одномерном пространстве. Тем временем увеличивается количество исследований, в которых используются дву- и трехмерный подходы [23–24], в частности, влияние водного слоя на поверхности композита. Следовательно, для прогнозирования явления проникновения влаги в ПКМ необходима адекватная математическая модель в сочетании с ее аналитическим и/или численным решением.

Большинство исследований, направленных на выявление влияния влаги на свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ), сводятся к определению массы влаги (воды), поглощенной в течение установленного времени при определенной температуре. Предварительная подготовка образцов сводится к выбору образцов дублера и подвергаемого испытаниям одинаковых геометрических форм и размеров с последующим высушиванием до момента прекращения изменения массы образцов. В случае, когда это необходимо, проводится обработка кромки образцов ПКМ.

Согласно действующим нормативным документам отечественных и зарубежных изданий, можно отметить следующее:

- ISO 62, ASTM D 570 и ГОСТ 4650-80 являются стандартными методами измерения поглощения воды с погружением при различных температурах с использованием гравиметрического метода.
- ГОСТ 12423-2013 является модифицированным по отношению к международному стандарту ISO 291:2008 путем введения дополнений и уточнений. В качестве рабочей жидкости может быть использована не только дистиллированная вода.

- ГОСТ Р 56762-2015, ASTM D5229/D5229M, ГОСТ 4650-80, ISO 62:2008 регламентируют проведение испытаний в условиях кондиционирования и расчета однофазного коэффициента диффузии влаги по Фику, что не в полной мере описывает процесс диффузии влаги в многослойных ПКМ. Для расчета показателя содержания влаги в % и коэффициента диффузии по модели Фика используется прямолинейный участок кинетической кривой. По полученному или известному коэффициенту диффузии возможно оценить значение предельного влагосодержания ПКМ без учета поврежденной кромки.

- Для всех испытуемых образцов регламентируются необходимые для получения достоверных результатов геометрические размеры и процедуры подготовки к испытаниям.

- Существующие регламенты для определения степени влагопоглощения и водопоглощения ПКМ дают описания условий кондиционирования и воздействия внешних условий для расчета показателя содержания влаги в % и коэффициента диффузии по второму закону Фика. При расчете коэффициента диффузии по модели Фика используется прямолинейный участок кинетической кривой, получаемый на стадии сорбции.

- Все измерения проводятся гравиметрическим способом.

- В процессе диффузии влаги предварительно кондиционированные образцы подвергаются воздействию контролируемой атмосферы (концентрация паров и температура), при которой будет происходить конденсация пара на поверхности. Следовательно сконденсированная влага в виде тонкой пленки будет влиять на результаты исследования воздействия влажности. Как известно, прямой контакт с жидкостью, а не с ее паром обычно приводит к большему уровню поглощения (более высоким концентрациям насыщения), а значит возможны расхождения по данным коэффициента диффузии и содержания влаги в ПКМ.

- Расчет однофазного коэффициента диффузии влаги по Фику не в полной мере описывает процесс диффузии влаги в многослойных ПКМ. Модель диффузии Фика для более длительных периодов испытаний не удовлетворяет требованию допустимой погрешности для описания процесса поглощения влаги в полимер, что вызывает необходимость разработки новых моделей для достоверного описания и прогнозирования диффузии влаги в полимер.

Данные стандарты не дают исчерпывающей методической информации, в частности в обработке и оценке результатов испытаний, а также прогнозирования изменений свойств ПКМ и измерений, необходимых для предоставления данных для проектирования.

Значительная часть исследований по определению влияния влаги на прочностные характеристики ПКМ посвящена воздействию атмосферной влаги при проведении климатических испытаний в лабораторных и натуральных условиях [6–7, 20–30]. Так в работе [29] поглощенная стеклопластиком атмосферная влага была инициатором гидролиза и процесса до отверждения матрицы композита, в то же время обладала пластифицирующим действием.

Согласно ГОСТ 9.707-81 процессы старения, протекающие в материале, должны быть одинаковы, как в лабораторных, так и в натуральных испытаниях. Исходя из этого, авторы [26] предлагают выбирать температуру испытаний образцов ПКМ в условиях хранения (открытая площадка) как максимальную температуру воздуха по ГОСТ 15150 с учетом перегрева материала, в том числе вследствие действия солнечной радиации. Влажность ПКМ предлагается определять исходя из эффективных значений температурно-влажностного комплекса для предполагаемых условий эксплуатации ПКМ.

В работах зарубежных исследователей [17] встречается термин гигротермическое воздействие, которое влияет на снижение температуры стеклования полимеров и может спровоцировать пластификацию полимерной матрицы, приводящей к снижению доминирующих свойств сопротивления матрицы. Гигротермический эффект, по сути, есть гидротермический эффект, определяющий условия проведения климатических испытаний [21], который способствует увеличению пустот, расширению полимерной цепи и вызывает микротрещины в матрице. Деструктив-

ные изменения происходят, как правило, из-за деградации физико-химических взаимодействий между смолой и волокном, и, как следствие, происходит смещение волокна, вызывающее расслоение композита и в итоге снижение свойств материала. Уровень напряжений в ПКМ существенно влияет на кинетику диффузии влаги. Это ставит под сомнение правильность стандартных методик оценки работоспособности ПКМ, находящихся в непосредственном контакте с влажной средой, на образцах в свободном, ненагруженном состоянии. Обобщение результатов таких исследований поведения материала в нагруженном состоянии является несопоставимым. Таким образом, подтверждается необходимость проведения испытаний образцов ПКМ с приложением статических нагрузок эксплуатационного уровня, как в натуральных, так и в лабораторных исследованиях.

В работе [27] показано, что для образцов углепластика ВКУ-38 достижение равновесного водопоглощения для образцов после экспонирования достигается быстрее, чем для исходных образцов. Равновесное водопоглощение устанавливается на 30-40 сутки. При этом значения равновесного водосодержания были выше у образцов, экспонируемых в условиях умеренного климата (г. Москва) и очень холодного климата (г. Якутск) – до 1,1 %. Причиной увеличения значения водопоглощения и изменения характера кривых сорбции углепластиков при длительном экспонировании стало изменение поверхностного рельефа и наличие дефектов на поверхности материалов, что подтверждается работой [28] для экстремально холодного климата.

Воздействие на ПКМ естественно-климатических факторов в работе [25] привело к снижению межфазной передачи напряжений из-за пластификации матрицы, химических изменений и механического разложения на границе раздела фаз. Результаты испытаний на растяжение композитов эпоксидная смола/MWCNT после термовлажностного старения показали, что из-за пластификации увлажненных ПКМ, снижение модуля упругости и прочности было практически одинаковыми (5-8 % и 18-22 % соответственно). Такой эффект связан с изменением внутреннего напряжения, условий и разрыва связи из-за объемного расширения между наночастицами и полимерной матрицей [30].

Проведение испытаний в лабораторных условиях обеспечивает получение сведений, необходимых для оценки изменения свойств материалов при воздействии климатических факторов. Однако полученные в условиях лабораторных испытаний результаты не могут корректно описывать взаимосвязи с результатами, полученными при натуральных климатических испытаниях, и чаще всего носят оценочный характер.

Прогнозирование срока службы материала и эксплуатационных условий ПКМ не всегда корректно прогнозируются, так как климатические испытания проводятся в основном в статических условиях. Испытания ПКМ на стойкость при совместном воздействии механических нагрузок и климатических факторов не так хорошо изучены в связи с отсутствием соответствующей нормативной документации и технических возможностей. Отсутствие информации о влиянии динамических механических (циклических) и других эксплуатационных нагрузок (тепловых, коррозионных и др.) на свойства ПКМ при старении в природных средах приводит к неблагоприятным последствиям.

Выводы

1. Для оценки возможности протекания необратимых/обратимых процессов под воздействием диффузии влаги в матрицу ПКМ необходимо проводить изучение изменения свойств влагонасыщенного и просушенного композиционного материала с контролем структурных изменений, происходящих внутри и на поверхности испытываемых образцов.

2. При оценке и прогнозе степени ухудшения прочностных свойств ПКМ, необходимо изучить динамику поглощения влаги и получить значение равновесного содержания влаги. В целях предупреждения потенциального отказа конструкционного материала в процессе эксплуатации,

необходимо разработать модель с достаточной вероятностью прогнозирования количества влаги, поглощенной композитным материалов в установленный момент времени в конкретных условиях.

3. Согласно изученным экспериментальным данным при климатических испытаниях увеличение значений влагопоглощения связано с процессами деструкции и выветривания полимерного связующего в поверхностном слое, разрастании микротрещин в глубь материала, увеличении количества микропор и, как вследствие, расслоение и снижение адгезии полимер-наполнитель. При разработке модели прогнозируемого влагопоглощения для конкретного композитного материала требуется экспериментальное определение диффузионных свойств полимера в зависимости от геометрических размеров, анизотропии материала, характера распределения концентрации влаги, явлений на границе полимер-наполнитель, краевых и температурных эффектов.

4. Для оценки снижения физико-химических и механических свойств ПКМ, в ходе проведения натурных испытаний, необходимо провести предварительные ускоренные климатические испытания с имитацией эксплуатационных условий с фиксированием исходных и подвергнутых изменениям показателей в соответствии с метеорологическими данными по региону.

5. Для понимания механизмов деструкции ПКМ подвергнутым натурным климатическим испытаниям необходимо проводить измерение кинетики влагосодержания экспонируемых образцов с целью выявления закономерностей при разработке математической модели сопоставимой с экспериментальными данными, получаемыми при экспонировании образцов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Раскутин А.Е.** Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. С. 349–367.

[2] **Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes P. L., Linul E.** Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications, *Polymers* 11, 1667 (2019), 11 p. 37.

[3] **Kar K.K.** Composite Materials. Processing, Application, Characterization. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017.

[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. С. 98–108.

[5] **Duncan B., Broughton W.** Absorption and diffusion of moisture in polymeric materials. Measurement Good Practice Guide. National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, UK, 2007.

[6] **Vaddadi P., Nakamura T., Singh R.P.** Inverse analysis for transient moisture diffusion through fiber-reinforced composites, *Acta Mater*, 51 (2003) 177–193.

[7] **Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валуева М.И., Воронина О.Г.** Влияние аппретирования углеродного волокна при получении объемно-армированных преформ на свойства высокотемпературного углепластика // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1. 12 с.

[8] **Николаев Е.В., Кириллов В.Н., Скирта А.А., Гращенко Д.В.** Исследование закономерностей влагопереноса и разработка стандарта по определению коэффициента диффузии и предельного влагосодержания для оценки механических свойств углепластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 3 (28) 5 с.

[9] **Joliff Y., Belec L., Chailan J.F.** Modified water diffusion kinetics in an unidirectional glass/fiber composite due to the interphase area: Experimental, analytical and numerical approach, *Compos. Struct.* 97 (2013) 296–303.

[10] **Bond D.A.** Moisture Diffusion in a fiber-reinforced composite: Part I. Non-Fickian transport and the effect of fiber spatial distribution, *J. Compos. Mater*, 39 (2004) 2113–2141.

- [11] **Peret T., Clement A., Freour S., Jacquemin F.** Numerical transient hygro-elastic analyses of reinforced Fickian and non-Fickian polymers, *Compos. Struct.*, 116 (2014) 395–403.
- [12] **Laplante G., Ouriadov A.V., Lee-Sullivan P., Balcom B.J.** Anomalous moisture diffusion in an epoxy adhesive detected by magnetic resonance imaging, *J. Appl. Polym. Sci.*, 109 (2008) 1350–1359.
- [13] **Dhakai H.N., Zhang Z.Y., Richardson M.O.W.** Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fiber reinforced unsaturated polyester composites, *Compos. Sci. Technol.*, 67 (2007) 1674–1683.
- [14] **Carter H.G., Kibler K.G.** Langmuir-Type model for anomalous moisture diffusion in composite resins, *J. Compos. Mater.*, 12 (1978) 118–131.
- [15] **Laplante G., Ouriadov A.V., Lee-Sullivan P., Balcom B.J.** Anomalous moisture diffusion in an epoxy adhesive detected by magnetic resonance imaging, *J. Appl. Polym. Sci.*, 109 (2008) 1350–1359.
- [16] **Peret T., Clement A., Freour S., Jacquemin F.** Numerical transient hygro-elastic analyses of reinforced Fickian and non-Fickian polymers, *Compos. Struct.*, 116 (2014) 395–403.
- [17] **Glaskova-Kuzmina T., Zotti A., Borriello A., Zarrelli M., Aniskevich A.** Basalt Fibre Composite with Carbon Nanomodified Epoxy Matrix under Hydrothermal Ageing, *Polymers*, 13, 532 (2021). P. 13.
- [18] **Korkees F., Alston S., Arnold C.** Directional diffusion of moisture into unidirectional carbon fiber/epoxy, *Composites: Experiments and modeling, Polym. Compos.*, 39 (2018) 2305–2315.
- [19] **Zile E., Aniskevich A., Zeleniakiene D.** Anisotropic water diffusion in mechanical joints of fiber-reinforced composite panels: numerical study, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 42 (490) (2020) 7 p.
- [20] **Старцев В.О., Плотников В.И., Антипов Ю.В.** Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях // Труды ВИАМ. 2018. № 5. С. 110–118.
- [21] **Гладких А.В., Курс И.С., Курс М.Г.** Анализ данных натуральных климатических испытаний, совмещенных с приложением эксплуатационных факторов, неметаллических материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 10. 9 с.
- [22] **Гуляев И.Н., Зеленина И.В., Валева Е.О., Хасков М.А.** Влияние климатического старения на свойства высокотемпературных углепластиков // Труды ВИАМ. 2021. № 2. 13 с.
- [23] **Sethi S., Ray B.C.** Computational identification of adsorption and desorption parameters for pore scale transport in periodic porous media, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 370 (2020) 16 p.
- [24] **Fan Y., Gomez A., Ferraro S., Pinto B., Muliana A., La Saponara V.** Diffusion of water in glass fiber reinforced polymer composites at different temperatures, *Journal of Composite Materials*, 53 (2019) 1097–1110.
- [25] **Славин А.В., Старцев О.В.** Свойства авиационных стеклопластиков и углепластиков на ранней стадии климатического воздействия // Труды ВИАМ. 2018. № 9. С. 71–82.
- [26] **Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С.** Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги // Труды ВИАМ. 2014. № 7. С. 1–9.
- [27] **Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К.** Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // Известия АлтГУ. Физика. 2020. С. 41–51.
- [28] **Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф., Кычкин А.К., Лебедев М.П.** Статистическое описание формирования пористости в базальтопластиковых композиционных материалах при климатических испытаниях // Химическая технология. 2020. № 7. С. 317–324.
- [29] **Startseva L.T., Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S.** Moisture diffusion in glass-fiber-reinforced plastics after their climatic aging, *Doklady Physical Chemistry*, 456 (2014) 77–81.
- [30] **Lee J.H., Rhee K.Y., Lee J.H.** Effects of moisture absorption and surface modification using 3-aminopropyltriethoxysilane on the tensile and fracture characteristics of MWCNT, Epoxy nanocomposites. *Appl. Surf. Sci.*, 256 (2010) 7658–7667.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВА Елена Дмитриевна — младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», без степени.

E-mail: vasilyeva_edm@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>

ВАСИЛЬЕВА Алина Анатольевна — старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, канд. техн. наук.

E-mail: kiir@mail.ru

КЫЧКИН Анатолий Константинович — ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, без степени.

E-mail: kychkinplasma@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

REFERENCES

- [1] **А.Ye. Raskutin**, Rossiyskiye polimernyye kompozitsionnyye materialy novogo pokoleniya, ikh osvoyeniye i vnedreniye v perspektivnykh razrabatyvayemykh konstruksiyakh // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. 2017. S. 349–367.
- [2] **D.K. Rajak, D.D. Pagar, P.L. Menezes, E. Linul**, Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications, *Polymers* 11, 1667 (2019), 11 p. 37.
- [3] **K.K. Kar**, Composite Materials. Processing, Application, Characterization. Springer: Berlin / Heidelberg, Germany, 2017.
- [4] **Ye.A. Veshkin, V.O. Startsev, V.I. Postnov, A.A. Barannikov**, Klimaticheskiye vozdeystviya kak otsenka remontoprigradnosti izdeliy iz ugleplastika // *Trudy VIAM*. 2019. № 8. S. 98–108.
- [5] **B. Duncan, W. Broughton**, Absorption and diffusion of moisture in polymeric materials. Measurement Good Practice Guide. National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, UK, 2007.
- [6] **P. Vaddadi, T. Nakamura, R.P. Singh**, Inverse analysis for transient moisture diffusion through fiber-reinforced composites, *Acta Mater*, 51 (2003) 177–193.
- [7] **A.V. Nacharkina, I.V. Zelenina, M.I. Valuyeva, O.G. Voronina**, Vliyaniye appretirovaniya uglerodnogo volokna pri poluchenii ob'yemno-armirovannykh preform na svoystva vysokotemperaturnogo ugleplastika // *Trudy VIAM*. 2021. № 1. 12 s.
- [8] **Ye.V. Nikolayev, V.N. Kirillov, A.A. Skirta, D.V. Grashchenkov**, Issledovaniye zakonmernostey vlagoprenosa i razrabotka standarta po opredeleniyu koeffitsiyenta diffuzii i predelnogo vlagosoderzhaniya dlya otsenki mekhanicheskikh svoystv ugleplastikov // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. 2013. № 3 (28) 5 s.
- [9] **Y. Joliff, L. Belec, J.F. Chailan**, Modified water diffusion kinetics in an unidirectional glass/fiber composite due to the interphase area: Experimental, analytical and numerical approach, *Compos. Struct.* 97 (2013) 296–303.
- [10] **D.A. Bond**, Moisture Diffusion in a fiber-reinforced composite: Part I. Non-Fickian transport and the effect of fiber spatial distribution, *J. Compos. Mater*, 39 (2004) 2113–2141.
- [11] **T. Peret, A. Clement, S. Freour, F. Jacquemin**, Numerical transient hygro-elastic analyses of reinforced Fickian and non-Fickian polymers, *Compos. Struct.*, 116 (2014) 395–403.
- [12] **G. Laplante, A.V. Ouriadov, P. Lee-Sullivan, B.J. Balcom**, Anomalous moisture diffusion in an epoxy adhesive detected by magnetic resonance imaging, *J. Appl. Polym. Sci.*, 109 (2008) 1350–1359.
- [13] **H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, M.O.W. Richardson**, Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fiber reinforced unsaturated polyester composites, *Compos. Sci. Technol.*, 67 (2007) 1674–1683.

- [14] **H.G. Carter, K.G. Kibler**, Langmuir-Type model for anomalous moisture diffusion in composite resins, *J. Compos. Mater.*, 12 (1978) 118–131.
- [15] **G. Laplante, A.V. Ouriadov, P. Lee-Sullivan, B.J. Balcom**, Anomalous moisture diffusion in an epoxy adhesive detected by magnetic resonance imaging, *J. Appl. Polym. Sci.*, 109 (2008) 1350–1359.
- [16] **T. Peret, A. Clement, S. Freour, F. Jacquemin**, Numerical transient hygro-elastic analyses of reinforced Fickian and non-Fickian polymers, *Compos. Struct.*, 116 (2014) 395–403.
- [17] **T. Glaskova-Kuzmina, A. Zotti, A. Borriello, M. Zarrelli, A. Aniskevich**, Basalt Fibre Composite with Carbon Nanomodified Epoxy Matrix under Hydrothermal Ageing, *Polymers*, 13, 532 (2021). p.13.
- [18] **F. Korkees, S. Alston, C. Arnold**, Directional diffusion of moisture into unidirectional carbon fiber/epoxy, *Composites: Experiments and modeling*, *Polym. Compos.*, 39 (2018) 2305–2315.
- [19] **E. Zile, A. Aniskevich, D. Zeleniakiene**, Anisotropic water diffusion in mechanical joints of fiber-reinforced composite panels: numerical study, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 42 (490) (2020) 7 s.
- [20] **V.O. Startsev, V.I. Plotnikov, Yu.V. Antipov**, Obratimye efekty vliyaniya vlagi pri opredelenii mekhanicheskikh svoystv PKM pri klimaticheskikh vozdeystviyakh // *TRUDY VIAM*. 2018. № 5. S. 110–118.
- [21] **A.V. Gladkikh, I.S. Kurs, M.G. Kurs**, Analiz dannykh naturnykh klimaticheskikh ispytaniy, sovmeshchennykh s prilozheniyem ekspluatatsionnykh faktorov, nemetallicheskih materialov (obzor) // *Trudy VIAM*. 2018. № 10. 9 s.
- [22] **I.N. Gulyayev, I.V. Zelenina, Ye.O. Valevin, M.A. Khaskov**, Vliyaniye klimaticheskogo stareniya na svoystva vysokotemperaturnykh ugleplastikov // *Trudy VIAM*. 2021. № 2. 13 s.
- [23] **S. Sethi, B.C. Ray**, Computational identification of adsorption and desorption parameters for pore scale transport in periodic porous media, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 370 (2020) 16 p.
- [24] **Y. Fan, A. Gomez, S. Ferraro, B. Pinto, A. Muliana, V. La Saponara**, Diffusion of water in glass fiber reinforced polymer composites at different temperatures, *Journal of Composite Materials*, 53 (2019) 1097–1110.
- [25] **A.V. Slavin, O.V. Startsev**, Svoystva aviatsionnykh stekloplastikov i ugleplastikov na ranney stadii klimaticheskogo vozdeystviya // *Trudy VIAM*. 2018. № 9. S. 71–82.
- [26] **S.V. Panin, A.S. Startsev, A.S. Krotov**, Diagnostika nachalnoy stadii klimaticheskogo stareniya PKM po izmeneniyu koeffitsiyenta diffuzii vlagi // *Trudy VIAM*. 2014. № 7. S. 1–9.
- [27] **O.V. Startsev, M.P. Lebedev, A.K. Kychkin**, Starenie polimernykh kompozitsionnykh materialov v usloviyakh ekstremalno kholodnogo klimata // *Izvestiya AltGU. Fizika*. 2020. S. 41–51.
- [28] **G.G. Vinokurov, N.F. Struchkov, A.K. Kychkin, M.P. Lebedev**, Statisticheskoye opisaniye formirovaniya poristosti v bazaltoplastikovykh kompozitsionnykh materialakh pri klimaticheskikh ispytaniyakh // *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2020. № 7. S. 317–324.
- [29] **L.T. Startseva, S.V. Panin, O.V. Startsev, A.S. Krotov**, Moisture diffusion in glass-fiber-reinforced plastics after their climatic aging, *Doklady Physical Chemistry*, 456 (2014) 77–81.
- [30] **J.H. Lee, K.Y. Rhee, J.H. Lee**, Effects of moisture absorption and surface modification using 3-aminopropyltriethoxysilane on the tensile and fracture characteristics of MWCNT, Epoxy nanocomposites. *Appl. Surf Sci.*, 256 (2010) 7658–7667.

THE AUTHORS

VASILYEVA Elena D. – *Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”.*

E-mail: vasilyeva_edm@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>

VASILYEVA Alina A. – *V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*

E-mail: kiir@mail.ru

KYCHKIN Anatoliy A. – *V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*

E-mail: kychkinplasma@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

Статья поступила в редакцию 16.06.2021; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 29.03.2022.

The article was submitted 16.06.2021; approved after reviewing 28.03.2022; accepted for publication 29.03.2022.