

Исследование структуры и свойств

Физические методы исследования и контроля

УДК 678.06–419:677.521

РОЛЬ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© Е. О. Валедин¹, А. К. Шведкова¹, С. В. Бухаров²

Статья поступила 10 декабря 2014 г.

Рассмотрена роль тепловлажностных испытаний полимерных композиционных материалов (ПКМ) при разработке новых и сравнительном анализе исследуемых материалов. Показано влияние повышенной влажности окружающей среды на изменение температуры стеклования, области релаксационных переходов и прочностных свойств ПКМ при различных температурах эксплуатации. В предложенном подходе при комплексном исследовании стойкости полимерных матриц и ПКМ к воздействию климатических факторов нижняя температурная граница области стеклования полимерной матрицы ПКМ в состоянии предельного влагопоглощения рассматривается как верхний предел температурной области эксплуатации материала и изделия на его основе.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал; связующие; тепловлажностные испытания; сорбция влаги; влагопоглощение; структурные превращения; область и температура стеклования; прочность при изгибе.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) в последние годы приобретают все большую роль как основные конструкционные и функциональные составляющие авиационных, космических и машиностроительных изделий и аппаратов и используются взамен традиционных металлических сплавов [1]. Так, применение в авиастроении современных ПКМ обеспечивает не только существенное снижение массы конструкции, например, планера, но и повышение его ресурса и живучести, снижение затрат на производство и эксплуатацию самолета в целом.

К ПКМ, предназначенным для изготовления конструктивных элементов в машиностроении, предъявляются два основных требования: 1) обеспечение высоких механических характеристик; 2) стабильность заданных параметров прочности, модуля упругости и других показателей с учетом воздействия эксплуатационно-климатических факторов в течение всего срока службы [2].

Известно, что существенное влияние на ПКМ оказывают климатические факторы (температура, влажность, солнечная радиация и др.), которые способствуют развитию негативных физико-химических

процессов в материалах и серьезному снижению прочностных характеристик изделий за время их эксплуатации (25 – 30 лет) [3 – 10].

Для оценки стабильности свойств ПКМ и изделий из них традиционно используют два вида климатических испытаний: натурные и лабораторные, проведение которых регламентировано комплексом как отечественных, так и зарубежных стандартов. При экспозиции материалов и изделий в натуральных климатических условиях на объекты испытаний воздействует весь комплекс климатических факторов. Натурные испытания дают наиболее полную и достоверную информацию о поведении ПКМ в процессе длительного хранения или эксплуатации. В то же время такие испытания имеют существенные недостатки, заключающиеся в первую очередь в их длительности, которая может составлять 10 – 15 лет. Кроме того, для объективного исследования стойкости материала необходимо располагать соответствующими площадками в различных климатических зонах.

В работе [11] рассмотрены закономерности изменения климатической стойкости более 30 видов ПКМ на основе различных наполнителей (угле-, стекло-, органопластики) и связующих эпоксидного типа с предельными температурами эксплуатации 80 и 150 °С соответственно. Анализ результатов проведенных исследований показал, что изменение свойств

¹ Всероссийский НИИ авиационных материалов, Москва, Россия; e-mail: admin@viam.ru

² МАТИ — РГТУ им. К. Э. Циолковского, Москва, Россия; e-mail: trnm-mati@yandex.ru

ПКМ при старении зависит прежде всего от химического состава полимерной матрицы, стабильности переходного слоя на границе матрица — наполнитель и степени подверженности старению армирующих наполнителей. Снижение деформационно-прочностных характеристик ПКМ, особенно при максимальных температурах эксплуатации, может достигать 50 % и более, температуры стеклования полимерных матриц — 25 °C и более.

Одни из наиболее значимых климатических факторов, влияющих на свойства ПКМ в процессе хранения и эксплуатации изделий из них, — влажность и повышенная температура [12, 13]. Лабораторные тепловлажностные испытания, занимающие существенно меньшее время по сравнению с натурными, так как проводятся, как правило, на форсированных режимах, позволяют уже на этапе разработки связующих и ПКМ на их основе оценить влияние климатических факторов на структуру и прочностные свойства материалов, подобрать оптимальные рецептуры и компоненты, провести сравнительные испытания различных партий материалов и отработать технологические режимы изготовления композитов. Результаты тепловлажностных испытаний также могут использоваться для выявления возможных дефектов в изделиях и грубых нарушений технологического процесса их изготовления. Результаты испытаний могут применяться для сравнительной оценки климатической стойкости материалов, технологий, конструктивных решений изделий и узлов с применением ПКМ.

В реальных климатических условиях эксплуатации скорость сорбции влаги в материал не велика, и теоретическое предельное влагопоглощение практически не достигается за весь срок службы изделия. Однако для определения расчетных значений прочностных свойств конструкционных ПКМ, оценки их стабильности и влияния на них климатических факторов необходимо знание предельных значений снижения характеристик прочности в предполагаемых климатических условиях эксплуатации. На этапах разработки материалов это достигается проведением форсированных лабораторных тепловлажностных испытаний при повышенных температуре и относительной влажности.

В общем случае сорбция влаги материалом характеризуется скоростью процесса и величиной предельного (равновесного) влагопоглощения. Причем температура в основном определяет скорость процесса, а относительная влажность — величину предельного влагопоглощения.

Исследования тепловлажностного старения (ТВС) ПКМ показали, что влагопоглощение конструкционных ПКМ и связанная с ним потеря прочности определяются типом полимерной матрицы, ее структурой, составом композиции связующего, степенью отверждения, способом переработки, толщиной и порис-

тостью образца, а также состоянием межфазного слоя на границе раздела матрица — наполнитель [14].

При ТВС влага может вступать в химическое взаимодействие с материалом (в основном с полимерной матрицей), вследствие чего наблюдаются гидролиз макромолекул и возможные последующие реакции деструкции либо переструктурирования полимерной матрицы, что может привести к существенному изменению свойств. Однако действие влаги проявляется не только в химическом взаимодействии с компонентами ПКМ (полимерной матрицы, волокнистым наполнителем). Поглощенная влага заполняет собой различные микродефекты, вызывая микрорастрескивание матрицы в местах концентрации остаточных напряжений и ослабляя адсорбционное взаимодействие на границе раздела фаз [15, 16]. Диффундируя в полимерную матрицу, она также может выступать в качестве пластификатора, ослаблять межмолекулярные связи и увеличивать тем самым подвижность макромолекул и релаксацию внутренних напряжений. Все эти изменения могут привести к снижению температуры стеклования полимерной матрицы в ПКМ [17] и, как следствие, температуры эксплуатации узлов и конструкций из ПКМ. В связи с этим необходим контроль надмолекулярной структуры матрицы до и после ТВС с помощью таких современных методов, как термомеханический (ТМА), динамический механический (ДМА) и термогравиметрический (ТГА) анализы, дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) и инфракрасная спектроскопия (ИК-спектроскопия).

Традиционный подход в области исследования стойкости ПКМ к климатическому воздействию сводится к экспозиции образца в условиях, имитирующих воздействие одного или нескольких факторов окружающей среды, с последующими прочностными испытаниями при 20 °C и рабочей температуре. По изменению контролируемой прочностной характеристики в исходном состоянии и после экспозиции определяют расчетное значение показателя прочности и подтверждают или корректируют рабочую температуру.

Методически такой подход не дает полного представления об изменении прочности ПКМ на всем температурном диапазоне эксплуатации, тем более в условиях совместного воздействия на материал температуры и влаги, ведущего к снижению температуры стеклования и, как следствие, температуры эксплуатации. Некоторые положения комплексного подхода к оценке стойкости ПКМ к воздействию влияния климатических факторов рассмотрены в работах [17, 18].

Анализ обобщенных результатов лабораторных испытаний ПКМ на воздействие эксплуатационно-климатических факторов показал, что при тепловлажностных испытаниях целесообразно определение температурных зависимостей деформационно-прочностных характеристик образцов материала в исходном состоянии и в состоянии равновесного влагопо-

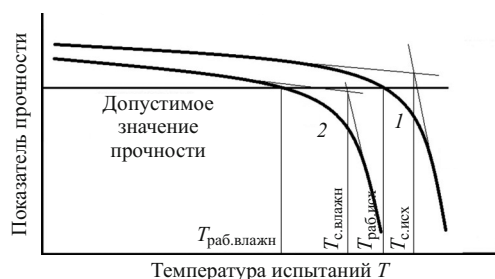


Рис. 1. Температурная зависимость прочности материала в исходном состоянии (1) и в состоянии равновесного влагопоглощения (2)

глощения. Температуры прочностных испытаний в исходном состоянии и состоянии равновесного влагопоглощения следует определять по данным термического анализа (ДТА, ДСК, ДМА и др.) — они должны быть ниже температур начала фазохимических превращений.

Прочностные характеристики должны определяться не менее чем при четырех температурах в интервале от 20 °С до температуры эксплуатации, а также при температуре не менее чем на 10 °С ниже температуры стеклования. Пример зависимости прочности материала от температуры в исходном состоянии и после тепловлажностного воздействия (в состоянии равновесного влагопоглощения) представлен на рис. 1. По сравнению с исходным состоянием (кривая 1) в состоянии равновесного влагопоглощения (кривая 2) при сохранении заданного допустимого значения прочности наблюдается существенное снижение рабочей температуры материала вследствие падения температуры стеклования (с $T_{\text{раб.исх}}$ до $T_{\text{раб.влажн}}$ и с $T_{\text{с.исх}}$ до $T_{\text{с.влажн}}$ соответственно).

В зависимости от материала, исследуемой характеристики и др. характер кривых может быть различным, но алгоритм один и тот же — необходимо определить изменение свойства (например, прочностных характеристики) материала в состоянии равновесного влагопоглощения и соотнести с предельным допустимым значением данного свойства.

В процессе тепловлажностных испытаний влагопоглощение определяют на стандартных образцах ПКМ в виде пластин или дисков гравиметрическим методом по ГОСТ 4650 или ASTM D 5229 [19, 20]. По результатам взвешивания строят зависимость изменения влагопоглощения образца W_t от времени экспозиции t . В большинстве случаев кривая влагопоглощения имеет вид, изображенный на рис. 2, что говорит о псевдофизическом характере сорбции и подтверждается, например, исследованиями влагостойкости конструкционных стеклопластиков на основе эпоксидной матрицы [18, 21].

В соответствии с ГОСТ 12020 или ASTM D 5229 [20, 22] по кривой влагопоглощения определяют величину равновесного влагопоглощения W_p (см. рис. 2) и коэффициенты диффузии влаги, при необходимости



Рис. 2. Зависимость влагопоглощения от времени

строят температурную зависимость показателя прочности при различном влагопоглощении. В данном подходе к определению различных значений прочности при заданной температуре эксплуатации кривую температурной зависимости изменения прочностных свойств материала в состоянии равновесного влагопоглощения рассматривают как нижнюю (предельную) границу изменения прочностных свойств (см. рис. 1, кривая 2).

Нижнюю температурную границу области стеклования полимерной матрицы образца в состоянии равновесного влагопоглощения следует считать верхним пределом температурной области эксплуатации ПКМ и издвигать на его основе.

Такая схема проведения тепловлажностных испытаний ПКМ предполагает комплекс исследований для образцов как композиционного материала, так и ненаполненной отвержденной полимерной матрицы, используемой в качестве связующего. Анализируя отдельно компоненты материала на стойкость к воздействию климатических факторов, можно на ранних этапах разработки и исследования материала сделать предположение о поведении будущего ПКМ в данных условиях, а также выбрать наиболее подходящие связующие, армирующие наполнители и технологию изготовления с точки зрения устойчивости ПКМ к воздействию окружающей среды.

Исследования стойкости и сохранности свойств материала в условиях повышенной влажности проводят как при нескольких влажностях в изотермических условиях, так и при постоянной влажности при различных значениях температуры, что определяется целью исследования (сравнительные испытания, определение сроков службы, прогнозирование поведения материала). В подобных экспериментах получают зависимость коэффициента диффузии влаги в материале от температуры и влажности.

Сушка (десорбция) после достижения материалом предельного влагопоглощения зачастую позволяет получить более достоверные значения коэффициента диффузии влаги [23]. Кроме того, по данным, полученным в процессе десорбции, в ходе термического анализа и прочностных испытаний после сушки можно судить об обратимости или необратимости изменений в материале, возникших при тепловлаж-

ностном воздействии, что может быть основанием для корректировки температурной области эксплуатации ПКМ.

Таким образом, тепловлажностные испытания и исследование изменения свойств ПКМ после экспозиции в тепловлажностных условиях — необходимое требование при разработке новых материалов. В большинстве случаев предложенный подход нужно рассматривать как сравнительный и исследовательский, который лишь косвенно позволяет судить о поведении материала в реальных условиях хранения и эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7 – 17.
2. Кириллов В. Н., Ефимов В. А. Проблемы исследования климатической стойкости авиационных неметаллических материалов / В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ»: Юбилейный науч.-технич. сб. — М.: ВИАМ, 2007. С. 379 – 388.
3. Старцев О. В., Аниховская Л. И., Литвинов А. А., Кротов А. С. Повышение достоверности прогнозирования свойств полимерных композиционных материалов при термовлажностном старении / Доклады академии наук. 2009. Т. 428. № 1. С. 56 – 60.
4. Кириллов В. Н., Ефимов В. А., Шведкова А. К., Николаев Е. В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ / *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 4. С. 41 – 45.
5. Ефимов В. А., Кириллов В. Н., Шведкова А. К., Николаев Е. В. Влияние условий экспозиции на прочностные свойства полимерных композиционных материалов / В сб. докл. IX Международной науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012». 2012. С. 171 – 175.
6. Kablov E. N., Kirillov V. N., Startsev O. V., Krotov A. S. Climatic aging of composite aviation materials: II. Relaxation of the initial structural nonequilibrium and and through-thickness gradient of properties / *Russian metallurgy (Metally)*. 2011. Vol. 2011. N 10. P. 1001 – 1007.
7. Kablov E. N., Kirillov V. N., Startsev O. V., Krotov A. S. Climatic aging of composite aviation materials: I. Aging mechanisms / *Russian metallurgy (Metally)*. 2011. Vol. 2011. N 10. P. 993 – 1000.
8. Кириллов В. Н., Вапиров Ю. М., Дрозд Е. А. Исследование атмосферной стойкости полимерных композиционных материалов в условиях атмосферы теплого влажного и умеренно теплого климата / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 4. С. 31 – 38.
9. Ефимов В. А., Старцев О. В. Исследование климатической стойкости полимерных материалов. Проблемы и пути их решения / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 412 – 422.
10. Ефимов В. А., Шведкова А. К., Коренькова Т. Г., Кириллов В. Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натурных условиях / *Труды ВИАМ*. 2013. № 1. Ст. 05.
11. Вапиров Ю. М., Кириллов В. Н., Кривонос В. В. Закономерности изменения свойств полимерных композитов конструкционного назначения при длительном климатическом старении в свободном и нагруженном состояниях / В сб. докл. VI Международной науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2006». Ч. II. — М., 2006. С. 103 – 108.
12. Павлов Н. Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. — М.: Химия, 1982. — 224 с.
13. Кутыинов В. Ф., Киреев В. А., Старцев О. В., Шевалдин В. Н. Влияние климатического старения на характеристики упругости и прочности полимерных композитных материалов / *Ученые записки ЦАГИ*. 2006. Т. XXXVII. № 4. С. 54 – 63.
14. Кириллов В. Н., Ефимов В. А., Шведкова А. К., Алексашин В. Н., Зуев А. В., Николаев Е. В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства углепластика КМУ-11ТР / В сб. докл. VIII Международной науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2010». Ч. II. — М., 2010. С. 111 – 115.
15. Кириллов В. Н., Ефимов В. А., Вапиров Ю. М. К вопросу о возможности прогнозирования атмосферной стойкости ПКМ / В сб. докл. VII Международной науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2008». Ч. I. — М., 2008. С. 307 – 313.
16. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Кротов А. С., Кириллов В. Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения / *Деформация и разрушение материалов*. 2011. № 11. С. 19 – 27.
17. Кириллов В. Н., Мараховский П. С., Зуев А. В., Шведкова А. К. Применение термоаналитических методов при исследовании влагопоглощения полимерных композиционных материалов / *Материаловедение*. 2013. № 8. С. 8 – 13.
18. Валиев Е. О., Бухаров С. В., Кириллов В. Н., Мелехина М. И., Мараховский П. С. Исследование влагонепроницаемости конструкционных стеклопластиков при лабораторных тепловлажностных испытаниях / *Пластические массы*. 2014. № 1 – 2. С. 26 – 30.
19. ГОСТ 4650–80. Пластмассы. Методы определения влагопоглощения.
20. ASTM D 5229–92. Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials.
21. Игонин Н. Г. Исследование особенностей (нефиговых аномалий) диффузии воды в полимерных композиционных материалах. — М.: Спутник+, 2008. — 182 с.
22. ГОСТ 12020. Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред.
23. Николаев Е. В., Кириллов В. Н., Сирота А. А., Гращенков 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. С. 44 – 48.

REFERENCES

1. Kablov E. N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N S. P. 7 – 17 [in Russian].
2. Kirillov V. N., Efimov V. A. Problemy issledovaniya klimaticheskoi stoikosti aviatsionnykh nemetallicheskih materialov / In: 75 years. Aviation materials. Selected Works of VIAM: Jubilee Sci.-Tech. Collection. — Moscow: Izd. VIAM, 2007. P. 379 – 388 [in Russian].
3. Startsev O. V., Anikhovskaya L. I., Litvinov A. A., Krotov A. S. Povyshenie dostovernosti prognozirovaniya svoistv polimernykh kompozitsionnykh materialov pri termovlazhnostnom starenii / *Dokl. RAN*. 2009. Vol. 428. N 1. P. 56 – 60 [in Russian].
4. Kirillov V. N., Efimov V. A., Shvedkova A. K., Nikolaev E. V. Issledovanie vliyaniya klimaticheskikh faktorov i mekhanicheskogo nagruzheniya na strukturu i mekhanicheskie svoistva PKM / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2011. N 4. P. 41 – 45 [in Russian].
5. Efimov V. A., Kirillov V. N., Shvedkova A. K., Nikolaev E. V. Vliyaniye usloviy ekspozitsii na prochnostnye svoistva polimernykh kompozitsionnykh materialov / In: Proc. of the IX Int. Sci. Conf. on Hydroaviation "Gidroaviasalon 2012." 2012. P. 171 – 175 [in Russian].
6. Kablov E. N., Kirillov V. N., Startsev O. V., Krotov A. S. Climatic aging of composite aviation materials: II. Relaxation of the initial structural nonequilibrium and and through-thickness gradient of properties / *Russian metallurgy (Metally)*. 2011. Vol. 2011. N 10. P. 1001 – 1007.
7. Kablov E. N., Kirillov V. N., Startsev O. V., Krotov A. S. Climatic aging of composite aviation materials: I. Aging mechanisms / *Russian metallurgy (Metally)*. 2011. Vol. 2011. N 10. P. 993 – 1000.
8. Kirillov V. N., Vapirov Yu. M., Drozd E. A. Issledovanie atmosferno stoikosti polimernykh kompozitsionnykh materialov v usloviyakh atmosfery teplogo vlazhnogo i umerenno teplogo klimata / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N 4. P. 31 – 38 [in Russian].
9. Efimov V. A., Startsev O. V. Issledovanie klimaticheskoi stoikosti polimernykh materialov. Problemy i puti ikh resheniya / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N S. P. 412 – 422 [in Russian].
10. Efimov V. A., Shvedkova A. K., Koren'kova T. G., Kirillov V. N. Issledovanie polimernykh konstruktivnykh materialov pri vozdeystviy klimaticheskikh faktorov i nagruzok v laboratornykh i naturnykh usloviyakh / *Trudy VIAM*. 2013. N 1. Art. 05 [in Russian].
11. Vapirov Yu. M., Kirillov V. N., Krivonos V. V. Zakonomernosti izmeneniya svoistv polimernykh kompozitov konstruktivnogo naznacheniya pri dlitel'nom klimaticheskom starenii v svobodnom i nagruzhennom sostoyaniyakh / In: Proc. of the IX Int. Sci. Conf. on Hydroaviation "Gidroaviasalon 2012." Part II. — Moscow, 2006. P. 103 – 108 [in Russian].

12. **Pavlov N. N.** Starenie plastmass v estestvennykh i iskusstvennykh usloviyakh. — Moscow: Khimiya, 1982. — 224 p. [in Russian].
13. **Kut'inov V. F., Kireev V. A., Startsev O. V., Shevaldin V. N.** Vliyaniye klimaticheskogo stareniya na kharakteristiki uprugosti i prochnosti polimernykh kompozitnykh materialov / Uch. Zap. TsAGI. 2006. Vol. XXXVII. N 4. P. 54 – 63 [in Russian].
14. **Kirillov V. N., Efimov V. A., Shvedkova A. K., Aleksashin V. N., Zuev A. V., Nikolaev E. V.** Issledovanie vliyaniya klimaticheskikh faktorov i mekhanicheskogo nagruzheniya na strukturu i mekhanicheskie svoystva ugleplastika KMU-11TR / In: Proc. of the VIII Int. Sci. Conf. on Hydroaviation "Gidroaviasalon 2010." Part II. — Moscow, 2010. P. 111 – 115 [in Russian].
15. **Kirillov V. N., Efimov V. A., Vapirov Yu. M.** K voprosu o vozmozhnosti prognozirovaniya atmosfernoï stoïkosti PKM / In: Proc. of the VII Int. Sci. Conf. on Hydroaviation "Gidrosalon 2008." Part I. — Moscow, 2008. P. 307 – 313 [in Russian].
16. **Kablov E. N., Startsev O. V., Krotov A. S., Kirillov V. N.** Klimaticheskoe starenie kompozitsionnykh materialov aviatsionnogo naznacheniya. I. Mekhanizmy stareniya / Deform. Razrush. Mater. 2011. N 11. P. 19 – 27 [in Russian].
17. **Kirillov V. N., Marakhovskii P. S., Zuev A. V., Shvedkova A. K.** Priimenenie termoanaliticheskikh metodov pri issledovanii vlagopogloshcheniya polimernykh kompozitsionnykh materialov / Materialovedenie. 2013. N 8. P. 8 – 13 [in Russian].
18. **Valevin E. O., Bukharov S. V., Kirillov V. N., Melekhina M. I., Marakhovskii P. S.** Issledovanie vlagostoïkosti konstruktсионnykh stekloplastikov pri laboratornykh teplovlazhnostnykh ispytaniyakh / Plast. Massy. 2014. N 1 – 2. P. 26 – 30 [in Russian].
19. State Standard GOST 4650–80. Plastmassy. Metody opredeleniya vodopogloshcheniya [Plastics. Methods for determination of water absorption] [in Russian].
20. ASTM D 5229–92. Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials.
21. **Igonin N. G.** Issledovanie osobennostei (nefikovskikh anomalii) diffuzii vody v polimernykh kompozitsionnykh materialakh [The study features (non-Fickian anomalies) of water diffusion in polymeric composite materials]. — Moscow: Sputnik+, 2008. — 182 p. [in Russian].
22. State Standard GOST 12020. Plastmassy. Metody opredeleniya stoïkosti k deistviyu khimicheskikh sred [Plastics. Methods for determination of resistance to chemical environments] [in Russian].
23. **Nikolaev E. V., Kirillov V. N., Skirta A. A., Grashchenkov D. V.** Issledovanie zakonornostei vlagoperenosa i razrabotka standarta po opredeleniyu koeffitsienta diffuzii i predel'nogo vlagosoderzhaniya dlya otsenki mekhanicheskikh svoystv ugleplastikov / Aviats. Mater. Tekhnol. 2013. N 3. P. 44 – 48 [in Russian].