

УДК 620.1

А.Б. Лаптев¹, М.Р. Павлов¹, А.А. Новиков¹, А.В. Славин¹

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА СТОЙКОСТЬ К КЛИМАТИЧЕСКИМ ФАКТОРАМ (обзор)

Часть 1. Испытания новых материалов

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122

В первой части обзора на основе анализа мирового опыта проведения климатических испытаний определены основные тенденции развития, связанные с разработкой новых материалов. Показано, что параллельно с разработкой новых материалов должны разрабатываться соответствующие им методы климатических испытаний с учетом предыдущего опыта. Кроме того, для оценки и прогнозирования изменения свойств материалов в течение длительных сроков эксплуатации испытания материалов необходимо проводить ускоренными методами с построением математических моделей процессов деградации их свойств под действием заданных климатических и эксплуатационных факторов.

Ключевые слова: климатические испытания, СИАЛ, композиционный материал с памятью формы, литий-ионная батарея, инкапсулированный материал, радиационный охладитель, древесно-слоистый брус.

A.B. Laptev¹, M.R. Pavlov¹, A.A. Novikov¹, A.V. Slavin¹

CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF TESTING MATERIALS FOR RESISTANCE TO CLIMATIC FACTORS (review)

Part 1. Testing of new materials

In the first part of the review, based on the analysis of world experience in conducting climate tests, the main development trends related to the development of new materials are identified, and it is shown that in parallel with the development of new materials, appropriate methods of climate testing should be developed taking into account previous experience. It is shown that to assess and predict changes in properties of materials over a long operating life tests of materials are required to conduct accelerated methods of building mathematical models of processes of degradation of their properties under the given climatic and operating factors.

Keywords: climate testing, glare, shape memory composite material, lithium-ion battery, encapsulated material, radiation cooler, laminated wood.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Общая глобализация и увеличение авиационных перевозок во всем мире, а также развитие промышленности и транспорта в целом приводят к экологическим проблемам. Разработка новой техники и технологий все чаще упирается в преграды из законов, норм и правил, так или иначе связанных с защитой окружающей среды. Экологические нормы по количеству выбросов газов – продуктов сгорания топлив, а также нормы по шумовому, световому и радиационному загрязнению вынуждают

производителей искать альтернативные варианты развития техники, в том числе авиационной. В обзорах [1, 2] сообщается о требовании создания новых решений для удовлетворения общественного спроса на повышение безопасности, надежности, экологической совместимости и доступности летательных аппаратов. Для обеспечения безопасной эксплуатации воздушных судов при замене металлических материалов деталей на полимерные композиционные материалы (ПКМ) необходимо понимание изменения свойств этих материалов при воздействии климатических и эксплуатационных факторов. В настоящее время проводятся исследования и строятся прогнозы сохраняемости свойств ПКМ, как правило, на основании ускоренных климатических испытаний.

В статье [3] рассмотрены основные методы оценки изменения свойств ПКМ во времени. Изменение свойств материала после старения исследовали методом определения влагопереноса и влагонасыщения – аналогично работам [4, 5]. Суть методики состояла в выдержке плит углепластика в течение 88 ч при температуре 23 ± 2 °С и относительной влажности $50\pm 5\%$ без доступа света (ГОСТ 12423–2013). Затем плиты помещали в испытательную камеру с температурой 60 ± 2 °С и относительной влажностью $85\pm 3\%$ на 64 сут. При экспонировании образцы периодически извлекали, определяли изменение массы. Влагоперенос в ПКМ моделировали по второму закону Фика в одномерном приближении с постоянными граничными условиями аналогично работам, представленным в [6–8]. Для каждого образца определяли предельное влагосодержание и коэффициент диффузии.

Для оценки изменения во времени рельефа поверхности исследуемого материала использовали лазерный сканирующий микроскоп, позволяющий за одно сканирование получить трехмерную матрицу значений высоты поверхности исследуемой области. Вычисление показателей профиля поверхности и распределение высоты неоднородностей образцов углепластика проводятся аналогично работам [9, 10].

Для адекватного прогнозирования показателей старения необходима информация об изменении свойств ПКМ, которые определяют методами динамического механического анализа [7, 8], термомеханики [9], линейной дилатометрии и колориметрии [10].

Свойства ПКМ при воздействии климатических факторов во многом обусловлены геометрическими размерами образцов, особенно влияет на неоднородность старения толщина плит ПКМ. Многочисленными экспериментами доказано [2], что агрессивные климатические факторы оказывают свое отрицательное воздействие главным образом на поверхностный слой экспонируемых образцов. В результате экспонирования в открытых климатических условиях возникает устойчивый градиент показателей свойств по толщине образцов ПКМ.

Углепластики авиационного назначения выделяются из всех ПКМ на основе эпоксидных связующих, наиболее стойких к воздействию внешней среды [11, 12].

В исследовании [13] предложено использовать обобщенный показатель механических свойств ПКМ (R). При конкурирующем влиянии процессов структурной релаксации, доотверждения эпоксидных матриц, с одной стороны, деструкции и пластификации – с другой, зависимость показателя R от продолжительности климатических испытаний t в традиционной форме [11] аппроксимируется кинетическим уравнением для прогнозирования прочности ПКМ на длительные периоды эксплуатации:

$$R = \eta(1 - e^{-\lambda t}) - \beta \ln(1 + \chi t) + R_{\infty},$$

где η и β – параметры материала, которые могут быть найдены лабораторными ускоренными методами; λ и χ – характеристики материала и внешней среды.

Кроме того, проведение климатических испытаний материалов для обеспечения безопасной эксплуатации воздушных судов должно отвечать на вопрос об изменении свойств материала при воздействии сезонных климатических факторов, эксплуатационных нагрузок с учетом климатических зон и продолжительности нахождения судна в тех или иных условиях, а также на вопрос об оценке изменения свойств материала в составе изделия при изменении регламента обслуживания, климата и пр.

Климатические испытания материалов и конструктивно-подобных элементов должны быть проведены при назначении сроков эксплуатации и продлении сроков эксплуатации техники с минимальными статистически обоснованными погрешностями.

Анализ источников позволил разделить направления развития методов испытания материалов на преимущественные тенденции.

Тенденции, связанные с разработкой новых материалов

Армированный углеродным волокном полимер (углепластик) представляет собой наиболее широко используемый аэрокосмический конструкционный материал, помимо алюминиевых сплавов. Основными областями его применения являются конструктивные компоненты коробки крыла, оперения и фюзеляжа, а также поверхности управления (например, руль направления, руль высоты и элероны). Армированный стекловолокном полимер используется в обтекателях и подобных ему структурных компонентах. Арамидные волокнистые полимеры применяются там, где требуется высокая ударопрочность [14]. Волокнистые металлические композиты, особенно армированный стекловолокном алюминий (GLARE, СИАЛ), являются другими типами композиционных материалов (КМ), которые находят применение в аэрокосмической промышленности (особенно в Airbus A380) благодаря улучшенным механическим свойствам, таким как пониженная плотность, высокие прочность, жесткость и сопротивление усталости, по сравнению с монолитными металлами. Основными областями использования СИАЛов являются обшивка фюзеляжа и оперение [15, 16].

Развитие нанотехнологий дает возможность улучшить многофункциональные свойства КМ (физические, химические, механические и др.) на наноуровне. В отличие от обычных композитов, улучшение свойств нанокompозитов связано не с увеличением плотности материала, а с добавлением только небольшого количества наночастиц (слоистый силикат, функционализированные углеродные нанотрубки (УНТ), графитовые хлопья и т. д.) [17]. Для повышения стойкости КМ к окислению также можно включить в их состав наночастицы, такие как силикат, УНТ, многогранный олигомерный силсесквиоксан, которые могли бы образовывать пассивирующие слои. Добавление УНТ, кремнезема и слоистого силиката в композитную матрицу может способствовать диссипации энергии при разрушении конструкции, следовательно, повысить прочность КМ. В дополнение к повышению модуля упругости высокопрочные наночастицы, такие как непрерывные УНТ (модуль упругости которых составляет ~1000 ГПа), могут улучшить жесткость и прочность композита. Снижение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) КМ может быть достигнуто путем включения в полимерную матрицу нанонаполнителей, включая УНТ, углеродные нановолокна и силикаты [18, 19].

Таким образом, разработка нанокompозитов, с одной стороны, открывает возможность устранения избыточности и снижения массы изделия, что обеспечивает значительный потенциал в продвижении свойств аэрокосмических компонентов (особенно в снижении массы), а с другой стороны, каждый новый материал имеет свои особенности старения и деструкции под действием климатических и эксплуатационных

факторов. Улучшение гетерогенности материалов, как правило, приводит к меньшей устойчивости к старению, что должно быть дополнительно изучено с использованием ускоренных и натуральных климатических испытаний.

Строительная отрасль [20] является главным потребителем материалов – эксплуатация зданий сопровождается выделением парниковых газов (до 40–50% от мирового объема их производства). Наибольшее воздействие на окружающую среду зданий оказывается на этапе их (материалов) эксплуатации в связи с потреблением энергии на тепловое кондиционирование. Следовательно, для снижения этого энергопотребления необходимо использовать изоляционные материалы, которые в процессе жизненного цикла снижают свою эффективность. Сравнительная оценка жизненного цикла различных изоляционных материалов (полиуретан, экструдированный полистирол и минеральная вата) для анализа экологического профиля каждого типа изоляционных материалов в средиземноморском континентальном климате показала, что все три изоляционных материала продемонстрировали чистую положительную выгоду в течение 50-летнего срока службы – в связи со сниженными требованиями к отоплению здания. Наибольшее воздействие на окружающую среду связано с изоляционным материалом из полистирола, а наилучшие экологические показатели демонстрируют материалы с минеральной ватой. Что касается потребления, то полиуретан и минеральная вата имели схожие тепловые характеристики в течение всего года. Кроме того, экологический срок окупаемости показывает, что здания с теплоизоляционным материалом являются экологически эффективными, если используются не менее 7 (для минеральной ваты), 10 (полиуретан) и 12 лет (экструдированный полистирол). Результаты исследования также свидетельствуют о необходимости изучения климатической стойкости материалов и расчета экономической эффективности влияния изоляционных материалов при воздействии климата.

Полимерные композиты с памятью формы – это интеллектуальные материалы, которые могут изменять свою форму (от искаженной формы до первоначальной) в результате определенного воздействия: изменения температуры, электрического или магнитного поля, облучения определенными длинами волн света и т. д. Восстановление формы происходит за счет высвобождения внутреннего напряжения (вызванного вязкоупругой деформацией), «хранившегося» в материале [21, 22]. Композиты с памятью формы в аэрокосмических компонентах и системах используются в обшивке крыла самолета с морфинг-крылом, а также в солнечных решетках и отражательных антеннах спутников. К преимуществам КМ перед сплавами с памятью формы относятся меньшая плотность, более высокая деформируемость и восстанавливаемость формы, лучшая обработка и ценовая доступность.

Самовосстанавливающиеся композиты разработаны для повышения устойчивости КМ к повреждениям путем включения фармакологических агентов в системе микрокапсуляции или микрососудистой сети в полимерной матрице [23–25]. Механизм самовосстановления запускается микротрещинами, распространяющимися через микрокапсулы или микрососудистую систему, высвобождая целебные агенты в места микротрещин посредством капиллярного действия, после чего микротрещины связываются с полимеризованными целебными агентами. Применение механизма самовосстановления может повысить устойчивость композитов к повреждениям и срок их службы при умеренной потере прочности материала. Однако в ходе климатических испытаний потребуются дополнительное изучение того, насколько такие факторы, как температура, влажность, ультрафиолет и др., могут оказывать влияние на процессы самовосстановления композитов.

Технологичность является важным ограничением как в процессе выбора материала, так и в процессе оптимизации конструкции. Передовые методы производства (аддитивное производство, обработка пенометалла и усовершенствованная обработка металла) увеличивают свободу обоих этих процессов. Однако длительные производственные процессы, высокая стоимость, установление стандартов и протоколов и т. д. все еще остаются проблемами для аддитивного производства и производства вспененного металла [26, 27].

В работе [28] рассматривается опасность возгорания и взрыва литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИБ), что представляет серьезную опасность для их транспортировки и применения на воздушном судне. Использование для испытаний динамической барокамеры для изучения влияния циклического старения и давления окружающей среды на тепловые характеристики безопасности ЛИБ показало, что время начала разгерметизации корпусов зависит как от значения перепада температуры, так и от увеличения числа циклов перепада и/или уменьшения внешнего давления. Интервал времени между выделением газа и воспламенением уменьшается с увеличением числа циклов, а продолжительность горения увеличивается с уменьшением давления. Результаты рентгеновской компьютерной томографии показывают, что потеря и структурное повреждение материалов катода ЛИБ, а также побочные реакции являются основными факторами, приводящими к воспламенению. Большие значения перепада давления внутри ЛИБ облегчают доступ воздуха и приводят к взрыву.

Исследование механизмов деградации полимерных инкапсулированных материалов

В зависимости от климатических условий для полимерных инкапсулированных материалов известны различные механизмы деградации оптических, химических и морфологических свойств. Старение полимерных инкапсулирующих материалов, с одной стороны, связано с рабочей средой (влажностью, интенсивностью солнечного света, содержанием УФ-излучения и температурой), а с другой стороны, также и с условиями, неравномерными по всем плоскостям (попадание влаги более существенно на краю образца материала; диффузия кислорода более важна между ячейками, чем в центре ячейки; температура нагрева модуля тоже является неравномерной) [29].

В работе [30] проведено исследование таких экологически чистых материалов, как радиационные охладители: определяли изменение их свойств с течением времени, гигроскопичность, включая теплопроводность, коэффициент сопротивления влагонасыщению, удельную теплоемкость, насыпную плотность и пористость. Маломасштабный тест демонстрирует возможность оценки сохраняемости свойств материала стен с помощью расчетных методов и численного моделирования – риск увлажнения стен домов оценивали, анализируя климатические условия 20 крупных городов Южной Кореи.

Сильно отражая солнечное излучение и будучи высокоэмиссионными, дневные радиационные охладители могут охлаждаться под прямыми солнечными лучами. Эффективность радиационного охлаждения тесно связана с конкретными климатическими условиями и сильно зависит от температуры окружающего воздуха, скорости ветра, интенсивности солнечного и окружающего излучения.

В данной работе с использованием хорошо проверенной тепловой модели оценены характеристики охлаждения трех материалов радиационного охлаждения с разными оптическими свойствами в трех различных и репрезентативных климатических условиях. Анализ позволил лучше понять чувствительность материалов

дневного радиационного охлаждения к различным климатическим условиям, представить стратегии выбора идеальных спектральных свойств материалов и исследовать, как повысить эффективность охлаждения в неблагоприятных климатических условиях. Показано, что материалы радиационного охлаждения обладают лучшими эксплуатационными характеристиками в жарком и засушливом климате.

Развитие архитектурных приемов защиты зданий от климатического воздействия происходило на протяжении последнего столетия. В настоящее время климатические условия требуют архитектуры, которая более приспособлена к окружающей среде. Прибрежные районы признаны наиболее уязвимыми для последствий изменения климата. Ранее в ограниченном количестве исследований предлагались некоторые стратегии смягчения солнечного воздействия на тепловой комфорт и спрос на энергию в прибрежных тропических регионах.

Исследование [31] по этой проблеме проведено с целью оценки, анализа, сравнения и обсуждения влияния пассивных стратегий на тепловой комфорт и потребление энергии (а также внедрения фотоэлектрических панелей) в прибрежных регионах тропического климата. Все симуляции проводились в течение одного года с использованием программного обеспечения Design Builder. Полученные результаты показывают, что материалы с фазовым переходом (МФП) оказывают значительное влияние на тепловой комфорт и потребление энергии в офисе в различных условиях прибрежного тропического климата. Сочетание МФП с теплоизоляцией позволяет повысить коэффициент комфортности до 3% при одновременном снижении потребления энергии охлаждения на ~12% в трех исследуемых климатических зонах. В естественно вентилируемом здании наиболее значительное повышение коэффициента комфортности наблюдается при введении МФП в сочетании с теплоизоляцией, тогда как теплоизоляция наряду с внешним затенением приводит к наиболее существенному снижению потребления охлаждающей энергии кондиционируемого офисного здания (на ~19%) в трех исследуемых климатических условиях. Кроме того, внедрение фотоэлектрических панелей позволяет генерировать 43–79% от общего энергопотребления исследуемых зданий.

В работе [32] представлены механизмы деградации полимерных инкапсуляторов, используемых в фотоэлектрических модулях. Исследованы две группы фотоэлектрических модулей, которые подвергались воздействию двух типичных климатических условий, а именно – жаркого и влажного климата, а также жаркого и сухого климата. Оба типа модулей произведены компанией Siemens Solar в 1992 г. и подвергались воздействию наружного солнечного света и климата в течение 18 лет.

Поперечно-слоистый брус (CLT) – инженерный древесный материал, получаемый путем склеивания ламинатов в вертикальном направлении, активно используется в конструкциях крыш, полов и сдвиговых стен жилых и коммерческих зданий благодаря своей превосходной структурной устойчивости, изоляционным характеристикам и другим преимуществам. Ограждающая конструкция здания, на которую наносится древесный материал, должна быть спроектирована таким образом, чтобы предотвратить проблемы с влажностью. В исследовании [33] маломасштабный тест демонстрирует возможность оценки гигротермического поведения стенки с помощью ply-lam CLT методом численного моделирования. Кроме того, риск увлажнения стен домов ply-lam CLT оценен путем анализа климатических условий 20 крупных городов Южной Кореи. Результаты оценки влагоопасности свидетельствуют о том, что для обеспечения водостойкости оболочка должна проектироваться с учетом типа изоляционного материала, его гигротермических свойств, толщины, климатических условий местности и т. д.

Заключения

Исходя из мировых тенденций учета климатического воздействия на материалы, конструкции и сооружения, необходимо при освоении новых методов оценки воздействия природных сред учитывать следующее: разработка новых материалов с новыми свойствами требует предварительной экспериментальной оценки их способности сохранять свои свойства в течение заданного срока службы в условиях воздействия климата. Параллельно с разработкой новых материалов должны формироваться и развиваться соответствующие им методы климатических испытаний с учетом предыдущего опыта. Испытания следует проводить ускоренными темпами с построением математических моделей процессов деградации свойств материалов под действием тех или иных климатических факторов.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Часть 2. Новые подходы к оценке коррозивности приморских атмосфер // Коррозия: материалы, защита. 2016. №1. С. 1–15.
2. Sehra A.K., Woodrow W.Jr. Propulsion and power for 21st century aviation // Progress in Aerospace Sciences. 2004. Vol. 40. Issues 4–5. P. 199–235. DOI: 10.1016/j.paerosci.2004.06.003.
3. Валева Е.О., Старцев В.О., Зеленина И.В. Термическое старение, деградация поверхности и влагоперенос в углепластике марки ВКУ-38ТР // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2020. №6–7 (89). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-118-128.
4. Price J.C., Forrest J.S. Overview of the aviation industry and security in the post-9/11 world // Practical Aviation Security. Oxford: Predicting and Preventing Future Threats, 2016. P. 1–43. DOI: 10.1016/B978-0-12-804293-9.00001-1.
5. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №7. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-9-9.
6. Sastri S.B., Armistead J.P., Keller T.M. Phtalonitrile-carbon fiber composites // Polymer Composites. 1996. Vol. 17. No. 6. P. 816–822.
7. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно-теплом климате: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
8. Славин А.В., Старцев О.В. Свойства авиационных стеклопластиков и углепластиков на ранней стадии климатического воздействия // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №9 (69). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-71-82.
9. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // Деформация и разрушение материалов. 2019. №12. С. 7–16.
10. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. II. Развитие методов исследования ранних стадий старения // Деформация и разрушение материалов. 2020. №1. С. 15–21.
11. Старцев В.О., Валева Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2020. №8 (90). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
12. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.

13. Булманис В.Н., Старцев О.В. Прогнозирование изменения прочности полимерных волокнистых композитов в результате климатического воздействия. Якутск: Якутский филиал СО АН СССР; Институт физико-технических проблем Севера, 1988. 32 с.
14. Briassoulis D., Aristopoulou A., Bonora M., Verlot I. Degradation characterisation of agricultural low-density polyethylene films // *Biosystem Engineering*. 2004. No. 88. P. 131–143. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2004.02.010.
15. Amjadi M., Fatemi A. Multiaxial fatigue behavior of thermoplastics including mean stress and notch effects: Experiments and modeling // *International Journal of Fatigue*. 2020. No. 136. P. 55–71. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105571.
16. Makki M., Ayoub G., Abdul-Hameed H. et al. Mullins effect in polyethylene and its dependency on crystal content: a network alteration model // *The Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2017. No. 75. P. 1–22. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2017.04.022.
17. Cunliffe A.V., Davis A. Photo-oxidation of thick polymer samples. Part II: The influence of oxygen diffusion on the natural and artificial weathering of polyolefins // *Polymer Degradation and Stability*. 1982. No. 4. P. 17–37. DOI: 10.1016/0141-3910(82)90003-9.
18. Yakimets I., Lai D., Guigon M. Effect of photo-oxidation cracks on behaviour of thick polypropylene samples // *Polymer Degradation and Stability*. 2004. No. 86. P. 59–67. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.01.013.
19. Valadez-Gonzalez A., Cervantes-Uc J.M., Veleza L. Mineral filler influence on the photo-oxidation of high density polyethylene: I. Accelerated UV chamber exposure test // *Polymer Degradation and Stability*. 1999. Vol. 63. P. 253–260. DOI: 10.1016/S0141-3910(98)00102-5.
20. Llantoya N., Châferab M., Cabeza L.F. A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate // *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 225. No. 15. P. 11–32. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110323.
21. Kelly C.T., White J.R. Photo-degradation of polyethylene and polypropylene at slow strain-rate // *Polymer Degradation and Stability*. 1997. No. 56. P. 367–383. DOI: 10.1016/S0141-3910(96)00205-4.
22. Gulmine J.V.V., Janissek P.R.R., Heise H.M.M., Akcelrud L. Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering // *Polymer Degradation and Stability*. 2003. No. 79. P. 385–397. DOI: 10.1016/S0141-3910(02)00338-5.
23. Pruitt L.A. Deformation yielding, fracture and fatigue behavior of conventional and highly cross-linked ultra high molecular weight polyethylene // *Biomaterials*. 2005. No. 26. P. 905–915. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2004.03.022.
24. Sauer J.A., Richardson G.C. Fatigue of polymers // *International Journal of Fatigue*. 1980. No. 16. P. 499–532. DOI: 10.1007/BF02265215.
25. Qi Z., Hu N., Li Z., Zeng D., Su X. A stress-based model for fatigue life prediction of high density polyethylene under complicated loading conditions // *International Journal of Fatigue*. 2019. No. 119. P. 281–289. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.10.007.
26. Каблов Е.Н., Шульдешов Е.М., Петрова А.П., Лаптева М.А., Сорокин А.Е. Зависимость комплекса свойств звукопоглощающего материала типа ВЗМК от концентрации гидрофобизирующего состава на основе кремнийорганического герметика // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. №2 (59). С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
27. Каблов Е.Н., Чайникова А.С., Щеголева Н.Е., Гращенков Д.В., Ковалева В.С., Белянчиков И.О. Синтез, структура и свойства алюмосиликатной стеклокерамики, модифицированной оксидом циркония // *Неорганические материалы*. 2020. Т. 56. №10. С. 1123–1129.
28. Xie S., Ren L., Yang X. et al. Influence of cycling aging and ambient pressure on the thermal safety features of lithium-ion battery // *Journal of Power Sources*. 2020. Vol. 448. No. 2. Art. 227425. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227425.
29. Fenga J., Gaoa K., Santamourisab M. et al. Dynamic impact of climate on the performance of daytime radiative cooling materials // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2020. Vol. 208. No. 5. Art. 110426. DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110426.

30. Qiaoab Y., Yangab L., Baoab J. et al. Reduced-scale experiments on the thermal performance of phase change material wallboard in different climate conditions // *Building and Environment*. 2019. Vol. 160. No. 8. P. 106–191. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106191.
31. Kameni M., Jean N., Vanona C. et al. Application of phase change materials, thermal insulation, and external shading for thermal comfort improvement and cooling energy demand reduction in an office building under different coastal tropical climates // *Solar Energy*. 2020. Vol. 207. No. 9. P. 458–470. DOI: 10.1016/j.solener.2020.06.110.
32. Hanabc H., Yanb H., Wangc X. et al. Analysis of the degradation of encapsulant materials used in photovoltaic modules exposed to different climates in China // *Solar Energy*. 2019. Vol. 194. No. 12. P. 177–188. DOI: 10.1016/j.solener.2019.10.014.
33. Changa S.J., Wia S., Goo S. et al. Moisture risk assessment of cross-laminated timber walls: Perspectives on climate conditions and water vapor resistance performance of building materials // *Building and Environment*. 2020. Vol. 168. No. 1. Art. 106502. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106502.