

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 2. Основные тенденции¹**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108

Во второй части обзора на основе анализа мирового опыта проведения климатических испытаний определены основные тенденции развития, связанные с новым применением материалов, их совместимостью, моделированием циклов нагружения, ускорением климатических испытаний, воздействием градиентов климатических факторов, учетом уровня климатических факторов в конкретной местности с минимальным разрешением, изменением климата, новыми методами оценки климатической стойкости материалов и биологическими факторами воздействия. Показана актуальность комплексных испытаний материалов на климатическую и биологическую стойкость с применением методов прогнозирования их свойств.

Ключевые слова: климатические испытания, полимерный композиционный материал, авиационные материалы, определение сроков эксплуатации, ускоренные климатические испытания, градиент климатических факторов.

*А.В. Laptev¹, М.Р. Pavlov¹, А.А. Novikov¹, А.В. Slavin¹***CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF TESTING MATERIALS
FOR RESISTANCE TO CLIMATIC FACTORS (review)
Part 2. Main trends**

In the second part of the review, based on the analysis of the world experience in conducting climate tests, the main development trends related to new applications of materials, their compatibility, modeling of loading cycles, acceleration of climate tests, the impact of climate gradients, taking into account the level of climate factors in a particular area with a minimum resolution, climate change, new methods for assessing the climatic resistance of materials and biological impact factors are identified. The relevance of complex tests of materials for climatic and biological resistance with the use of methods for predicting their properties is shown.

Keywords: climate tests, polymer composite materials, aviation materials, determination of service life, accelerated climate tests, gradient of climatic factors.

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

В настоящее время коммерческие самолеты сделали мир меньше благодаря глобальным сетям авиаперелетов. Это возможно в результате выбора производителем безопасных, надежных и передовых материалов для современных воздушных судов и

¹ Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», №1 (95), 2021.

их компонентов. Материалы, используемые при изготовлении конструкции самолета, должны удовлетворительно выдерживать перепады температур в диапазоне от -60 в полете до $+50$ °С на уровне земли и экстремальные нагрузки, а также иметь высокие показатели удельной прочности и жесткости [1]. В обзорах [2–5] представлены требования к созданию новых решений для удовлетворения общественного спроса на повышение безопасности, надежности, экологической совместимости и доступности летательных аппаратов.

Прогноз НАСА для самолетов XXI в. заключается в разработке двигательных установок, которые являются интеллектуальными, высокоэффективными, практически неслышимыми (за пределами границ аэропортов) и имеют почти нулевые вредные выбросы (CO_2 и NO_x) в атмосферу при эксплуатации. Это такие интеллектуальные двигатели, которые способны адаптироваться к изменяющимся внутренним и внешним условиям для оптимального выполнения задач при минимальном или полном отсутствии вмешательства человека. Использование распределенной векторной тяги заменит существующие конфигурации двигателей с 2–4 крыльями и фюзеляжем на самолеты с увеличенным количеством малых, мини- или микромоторов. Рассматриваются и другие инновационные концепции, например импульсно-детонационный двигатель, который потенциально может заменить обычные газотурбинные двигатели.

Предполагается, что водородная экономика приведет «революцию» двигательной установки к конечной цели – бесшумным самолетам с нулевым уровнем вредных выбросов в атмосферу, а также что электроприводная тяга, основанная на топливных элементах, генерирует электрическую энергию, которая в свою очередь будет приводить в движение двигатели для получения желаемой тяги.

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

Тенденции, связанные с новым применением материалов

Использование армированных волокнами композиционных материалов (КМ) в морской воде (например, при изготовлении компонентов приливных турбин и преобразователей энергии волн) становится привлекательным из-за уменьшения массы деталей и их повышенной коррозионной стойкости [6]. Однако когда полимерные матричные композитные структуры подвергаются воздействию морской водной среды, происходит деградация свойств материала, влияющая на надежность. Значительное замедление процессов старения композитных конструкций в морской воде имеет важное значение для обеспечения их работоспособности и долговечности.

В данной работе проведено исследование влияния старения в морской воде пяти различных композитов, изготовленных из двух типов волокнистых тканей (однонаправленного стекла и углерода) и трех типов смол (эпоксидной, винилэфирной и полиэфирной), на их механические свойства. Оценивается поведение образцов с ускоренным старением в морской воде, подвергнутых растягивающим, сжимающим, изгибным и сдвиговым нагрузкам. Значительное снижение прочности из-за старения наблюдалось на композитах с эпоксидными и полиэфирными матрицами. Исследование поверхности методом сканирующей электронной микроскопии выявило образование трещин, расслоение связующего, расслоение волокон и крошение смолы под действием морской воды.

Тенденции, связанные с совместимостью материалов

Наиболее остро вопросы совместимости материалов при воздействии климатических факторов встают после ремонта поверхностей с использованием

клеевых, крепежных и других типов соединений. В работе [7] проведен анализ на совместимость поверхностно-ремонтных растворов и дорожного покрытия при его ремонте: исследовали прочность сцепления, стойкость к истиранию/эрозии, циклическому воздействию усадки/расширения, прочность при сжатии, тепловую совместимость с базовым бетоном и т. д. в диапазоне температур от -50 до $+40$ °С. Различные строительные ремонтные композиции (в количестве 40), состоящие из полимерно-модифицированных цементных растворов, содержащих стирол-бутадиеновый каучук и акрил, а также эпоксидных растворов и эпоксидных эмульсий различных производителей, подвергали механическим и прочностным испытаниям. Результаты исследований показали, что $>65\%$ (сухое отверждение) и 89% (влажное отверждение) растворов имели прочность сцепления более высокую, чем у эталонного цементного раствора, а $>90\%$ растворов продемонстрировали лучшие результаты в испытании на стойкость к истиранию/эрозии. Аналогичным образом $>80\%$ растворов имели более высокую прочность при сжатии (84% – при сухом и 81% – при влажном отверждении), чем эталонный раствор. При испытании на усадку/расширение 53 и 66% поверхностных ремонтных растворов показали $<0,15\%$ чистого изменения и $0,2\%$ общего изменения соответственно, как указано в ASTM C928. Однако в тесте на тепловую совместимость с базовым бетоном только 36% растворов продемонстрировали лучшие результаты, что свидетельствует о его важности и преимуществах в суровых климатических условиях.

Таким образом, именно испытание на совместимость при перепадах температур является предпочтительным для выбора подходящих поверхностно-ремонтных растворов еще до проведения крупных ремонтно-восстановительных бетонных работ и является наиболее важным критерием отбора растворов и бетонов, особенно подвергающихся воздействию суровых климатических условий.

Тенденции, связанные с моделированием циклов нагружения

Предложена методика испытаний для оценки долговечности и надежности армированных керамических композитов для высокотемпературного применения. Стратегия основана на определении надежности этих материалов при воздействии случайных графиков нагружения, состоящих из механических нагрузок и температурных скачков, которые накладываются на другие постоянные значения напряжений и температур. Частота и величина скачков механической нагрузки и температуры будут репрезентативны для числа и характеристик переходных процессов, которые связаны с конкретным промышленным применением и которые, как ожидается, произойдут в течение срока службы компонента [8].

Тенденции, связанные с ускорением климатических испытаний

План технического обслуживания старых и современных зданий во многих городах (особенно исторических) приобретает важное значение и должен включать определение климатической среды, в которой расположены сооружения. Исследователи пытаются оценить реакцию строительных материалов на выветривание путем ускоренных испытаний на старение. Данный метод часто заключается в том, что материалы подвергаются воздействию экстремальных климатических параметров, не соответствующих реальным условиям окружающей среды. По этой причине такой тип старения вызывает много критики.

Поиск информации о реалистичном моделировании воздействия детерминированной окружающей среды/климата на строительные каменные материалы не дал результатов, поэтому предложен эксперимент моделирования климатического

старения каменных материалов древних памятников Сардинии (Италия) путем моделирования климатического контекста местности. Для этого образцы подвергались ускоренным испытаниям на старение в температурно-влажностном цикле и при воздействии солнечной радиации для моделирования реалистичных параметров средиземноморского климата. Мониторинг некоторых физико-механических свойств до и после старения свидетельствует об отслоении материала образцов, появлении мелкой сетки трещин и незначительном ухудшении их механических характеристик. Построено математическое уравнение, которое связывает продолжительность испытания на старение (6 мес) с гипотетическим воздействием на открытом воздухе, количественно составляющим ~18 лет – для образцов, эволюционировавших в циклах температуры и влажности, и ~3,7 года – для образцов, подвергавшихся только солнечному излучению. Однако тест должен воспроизводиться в естественной наружной среде для корреляции и проверки достоверности полученных данных [9].

В работе [10] также сообщается о необходимости построения математической модели изменения свойств материала во времени в зависимости от периодичности воздействия и величины климатических и эксплуатационных факторов. Для этого предлагается следующая последовательность действий:

- разработка критериев оценки изменения эксплуатационных характеристик материала от продолжительности и периодичности воздействия климатических и эксплуатационных факторов;
- определение количества необходимых экспериментов и условий их проведения для построения адекватной математической модели поведения материала во времени с заданной погрешностью получаемых результатов;
- разработка компьютерной программы расчета механических характеристик материала при введении данных полетного цикла, периодичности хранения, параметров климата на период прогноза.

Тенденции, связанные с воздействием градиентов климатических факторов

Для дорожных покрытий широко применяется такой метод климатических испытаний, как замораживание/оттаивание с различной скоростью изменения температур. В обзоре [11] приведены результаты анализа практического состояния дорожного покрытия в зонах влажного морозного климата и внедрения новых перспективных технологий для этих зон.

В исследовании, представленном в статье [12], выявляются лучшие практики проектирования и материалов для бетонных покрытий в условиях влажного морозного климата, аналогичного климату штата Мичиган.

Наилучшая практика для оценки бетонных покрытий – это натурные испытания, установленные в качестве стандарта, пригодного для широкого внедрения. Тем не менее внедрение материалов требует быстрого определения изменения характеристик при воздействии климата, поэтому в работе рекомендовано исследование дорожных покрытий на воздействие изменяющихся параметров температуры и влажности, т. е. исследование на изменение свойств материалов, которое должно проводиться не только при воздействии постоянно действующих факторов, но и при их изменении – градиенте. Это подтверждает не только опыт эксплуатации и изучения свойств дорожных покрытий, но и исследования, выполненные применительно к полимерным КМ, герметикам и резинам, т. е. ко всем материалам, склонным к влагонасыщению. Исследование воздействия влаги при одновременном влиянии температуры и влажности как энергетических характеристик поверхности полимеров приведено в работе [13].

Тенденции, связанные с учетом уровня климатических факторов в конкретной местности с минимальным пространственным разрешением

Работы, посвященные построению моделей прогнозирования изменения свойств материалов под действием изменяющихся климатических факторов [14], имеют логичное продолжение – получение более точных прогнозов в связи с более точными прогнозами метеорологических служб.

На основании метеорологических данных, расчетов и прямых измерений создаются тепловые карты с точностью измерения (расчета) температуры воздуха с пространственным разрешением до 1 м для более полного учета изменения, в том числе характеристик материалов. Например, в Нидерландах муниципалитеты проводят климатические стресс-тесты для изучения воздействия тепла, выделяемого прохожими [15]. До сих пор исследователям мешало обилие городских тепловых карт, составленных разными ведомствами с использованием различных метрик и методов. Для унифицирования стресс-тестов в статье представлена методология составления стандартизированной городской тепловой карты с пространственным разрешением 1 м. В качестве метрики теплового стресса выбрана физическая эквивалентная температура (ФЭТ).

Представлена эмпирическая регрессионная модель для ФЭТ, основанная на различных погодных данных и геометрическом расположении улиц в модели баланса тепловой энергии человека Rayman. Затем эта эмпирическая ФЭТ-модель оценена для г. Вагенинген (Нидерланды). В качестве исходных данных для модели использовались метеорологические наблюдения, сделанные на близлежащем эталонном участке, и простые географические данные. Кроме того, применены и разработаны устоявшиеся методы учета эффекта локального повышения температур и снижения скорости ветра в городе. Представленный метод валидирован на основе наблюдений велосипедного траверса ФЭТ. Скорость ветра является наиболее сложной функцией для отображения из-за его неустойчивого и локального поведения в городах. Тем не менее в работе [15] показано эффективное моделирование тепловой карты города.

Локальные данные об уровне климатических факторов позволят прогнозировать сроки сохраняемости свойств материалов стационарных сооружений и объектов. В статье [16] на основе анализа данных научно-технической литературы определены основные химические реакции, происходящие в полимере при воздействии температуры, влаги и ультрафиолетового излучения. Показана возможность применения методов квантовой химии для расчетов энергии воздействия климатических факторов на образование и разрыв связей между и внутри молекул в полимерном КМ для ранжирования факторов по степени деструктирующего воздействия. Построена модель полимера полиэтилентерефталата (лавсана), на примере которой рассчитано изменение энергии образования молекулярной системы из 2–3 полимерных молекул полиэтилентерефталата. Разработана кинетическая модель старения полиэтилентерефталата в результате увеличения энергии системы под действием климатических факторов.

Тенденции, связанные с изменением климата

Поскольку последствия изменения климата будут ощущаться наиболее непосредственно через изменения в водообеспеченности и водной безопасности, необходимы адекватные инструменты для поддержки решений по учету фактора влажности при испытаниях материалов.

В работе [17] рассматривается механизм воздействия рисков изменения климата на финансовые показатели корпораций по прямым и косвенным потерям.

Эмпирический анализ показывает, что существует корреляция между изменением климата и финансовыми показателями компаний.

Расчет климатических рисков с учетом неопределенности текущих глобальных климатических прогнозов позволяет получать с определенной долей вероятности локализованные оценки уязвимости водных ресурсов в условиях изменения климата.

Промышленность (особенно горнодобывающая отрасль) подвержена рискам, связанным с изменениями климата. В статье [16] рассматривается механизм воздействия таких рисков на финансовые показатели корпораций по прямым и косвенным признакам. Используются уникальные данные – индикаторы климатических рисков с пятью типами сценариев изменения климата – для анализа влияния данных рисков на котирующиеся на бирже акции минерально-сырьевых компаний Китая.

Эмпирический анализ показывает, что существует корреляция между изменением климата и финансовыми показателями горнодобывающих компаний. Однако горнодобывающие компании с различными видами ресурсов имеют разную чувствительность к рискам, связанным с изменениями климата, – такие риски оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на финансовые показатели компаний, которые должны активно внедрять стратегии снижения выбросов углекислого газа и раскрывать информацию о выбросах, чтобы повысить стоимость бренда и создать новые конкурентные преимущества для долгосрочного развития [18, 19].

Тенденции, связанные с новыми методами оценки климатической стойкости материалов

В Дании разработана и внедрена система мониторинга и оценки первичных выбросов летучих органических соединений (ЛОС) строительными материалами в соответствии с их воздействием на безопасность, комфорт и здоровье человека [20]. Система объединяет определение химических выбросов в течение длительного времени (месяцы), моделирование концентрации ЛОС и влияние на здоровье людей. В данной системе на первом этапе внимание фокусируется на комфорте, т. е. на степени раздражения запахом слизистой оболочки при отсутствии других соответствующих данных о воздействии внутреннего воздуха на организм человека. Установлены два критерия проектирования: система мониторинга и оценки должна быть легко реализуемой, но в то же время оперативной и динамичной. Принцип ее работы заключается в определении периода времени, необходимого для достижения соответствующей величины концентрации ЛОС в стандартном помещении. Определяется продолжительность насыщения ЛОС – показатель периода времени, в течение которого новый строительный материал может вызвать проблемы, связанные с качеством воздуха в помещении, если не будут приняты специальные меры предосторожности. Система маркировки и оценки апробирована на эмиссии ЛОС и оценке комфорта двух герметиков с использованием переносной и лабораторной эмиссионной ячейки (FLEC). Данный метод может быть использован не только для оценки комфорта, но и для определения степени выветривания легколетучих веществ из конструкционных полимерных КМ под воздействием климата, что представляется важным для определения содержания в материале пластификаторов специальных добавок против ультрафиолетового старения и для снижения горючести.

ASTM D2176-16 – стандартный метод испытаний на прочность бумаги и пластмассовой пленки при их складывании с помощью складного устройства – тестера M.I.T. [21], который может быть настроен для образцов любой толщины. Однако если наружные слои толщиной ~0,25 мм (0,01 дюйма) разрываются в течение первых нескольких складок, тест теряет свое значение.

ASTM D5870-16 – стандартная практика расчета индекса сохраняемости свойств пластмасс (PRI) [22], которая охватывает процедуры расчета индекса для термопластичных и термореактивных пластмасс после воздействия термического старения, естественного либо искусственного ускоренного выветривания или химического воздействия.

ASTM D3012-19 – стандартный метод испытаний на термоокислительную стабильность полипропилена с использованием вращения образца в печи [23].

Тенденции, связанные с биологическими факторами воздействия

В развитых странах мира экологические проблемы обостряются из-за увеличения количества бытовых и промышленных отходов, утилизация которых посредством специально выращенных или природных бактерий приводит к развитию агрессивных по отношению к новым полимерным материалам и композитам видов за счет естественного отбора и мутаций [24–26].

В ответ на развитие подобного рода утилизационных систем создаются нормативные документы, сопровождающие данные технологии.

ASTM D6954-18 – стандартное руководство по экспонированию и испытанию пластмасс, разлагающихся в окружающей среде в результате окисления и биodeградации [27], которое представляет собой основу (или дорожную карту) для сравнения и ранжирования контролируемых лабораторных скоростей деградации и степени потери физических свойств полимеров в результате процессов термо- и фотоокисления, а также биodeградации и экологических воздействий в определенных областях применения и средах захоронения после деградации. Условия утилизации при этом варьируются в зависимости от метода воздействия на почву, свалку и компост, в которых может происходить термическое окисление.

ASTM D6400-19 – стандартная спецификация для маркировки пластмасс, предназначенных для аэробного компостирования на муниципальных или промышленных объектах [28].

ASTM D7991-15 – стандартный метод испытаний для определения аэробной биodeградации пластмасс, захороненных в песчаных морских отложениях, в контролируемых лабораторных условиях [29]. Данный метод определяет уровень биodeградации пластмассовых материалов, подвергнутых воздействию лабораторных условий, имитирующих окружающую среду, находящуюся в песчаной приливной зоне.

В протоколе STP533 рассмотрена утилизация пластмасс с минимальным воздействием на окружающую среду [30].

ASTM F2759-19 – стандартное руководство по оценке сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), используемого в ортопедических и спинномозговых устройствах [31]. Руководство раскрывает общие рекомендации по физической, химической и биосовместимости, а также по механической и доклинической оценке СВМПЭ в имплантируемых ортопедических и спинномозговых устройствах, предназначенных для замены опорно-двигательного аппарата. Компоненты СВМПЭ могут включать коленные, тазобедренные, плечевые, локтевые, голеностопные и тотальные протезы дисков, а также имплантаты пальцев ног, пальцев рук и лучезапястных суставов. Данное руководство не распространяется на СВМПЭ в волокнистой или ленточной форме.

ASTM D5338-15 – стандартный метод испытаний для определения аэробной биodeградации пластмассовых материалов в контролируемых условиях компостирования, включающих термофильные температуры [32]. Данный метод определяет степень и скорость аэробной биodeградации при воздействии контролируемой компостирующей среды в лабораторных условиях при термофильных температурах и предназначен для получения воспроизводимых и статистически значимых результатов

испытаний в контролируемых условиях, которые напоминают условия компостирования, где достигаются термофильные температуры. Испытуемые вещества подвергаются воздействию инокулята, полученного из компоста, состоящего из твердых бытовых отходов.

ASTM E2317-04-12 – стандартное руководство по проведению испытаний жизненного цикла микрочастиц пластика на токсичность с помощью морского мейобентоса *Soropod* [33]. В руководстве описаны процедуры получения лабораторных данных о неблагоприятном воздействии исследуемого материала, добавляемого в морскую воду (но не в пищу), на морские организмы *Amphiascus tenuiremis* при непрерывном воздействии на особей (начиная с момента рождения и до начала размножения) с использованием метода культивирования. В течение тестового периода проверяют и регистрируют данные по стадийной выживаемости и количеству дней, необходимых для развития.

ASTM E1562-00 – стандартное руководство по проведению испытаний на острую, хроническую и жизненную токсичность в водной среде с использованием полихетовых кольчатых червей [34]. Руководство охватывает процедуры получения данных о неблагоприятном воздействии испытуемого материала, добавляемого в морские и эстуарные воды, на некоторые виды полихет при кратковременном или длительном непрерывном воздействии на особей. Виды полихет, используемые в этих испытаниях, взяты из лабораторных культур и подвергаются воздействию различных концентраций токсиканта в статических условиях. Данные процедуры могут быть полезны для проведения испытаний на токсичность с другими видами полихет, хотя могут потребоваться и модификации.

ASTM D7475-20 – стандартный метод испытаний для определения аэробной деградаци и анаэробной биодеградаци пластмассовых материалов в условиях ускоренного биореакторного полигона [35]. Данный метод используется для определения степени и скорости аэробной деструкции (о чем свидетельствует потеря прочности при растяжении, молекулярная масса, возможно, приводящая к дезинтеграции и фрагментации), а также анаэробной биодеградаци в ускоренной аэробно-анаэробной среде испытаний биореактора полигона для твердых бытовых отходов. Метод может имитировать переход от аэробной среды к анаэробной с течением времени по мере увеличения глубины свалки. На первом этапе испытуемый пластиковый материал смешивается с бытовыми отходами.

Заключения

Исходя из мировых тенденций учета климатического воздействия на материалы, конструкции и сооружения, необходимо при разработке новых методов оценки воздействия природных сред принимать во внимание следующее:

1. Математическое моделирование процессов воздействия климата позволит не только учитывать воздействие климатических факторов на основании прошлых многолетних параметров атмосферы, но и прогнозировать поведение материалов и конструкций при изменении климата.

2. Комплексные испытания на воздействие климатических и биологических факторов должны включать не только статичные постоянно действующие значения воздействующих факторов, но и учитывать воздействие градиентов климатических, биологических и эксплуатационных факторов. В качестве примера – использовать тест на тепловое старение с вращением, т. е. с потоком горячего воздуха.

3. Влияние биологических факторов при развитии систем биоутилизации, а также увеличение загрязнения природной среды различными видами искусственных пластмасс требуют создания отечественной системы стандартов по биодеструкции, тепловой, фото- и биоутилизации пластиков.

Библиографический список

1. Chatterjee B., Bhowmik S. Evolution of material selection in commercial aviation industry – a review // *Sustainable Engineering Products and Manufacturing Technologies*. 2019. P. 199–219. DOI: 10.1016/B978-0-12-816564-5.00009-8.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозийность морской атмосферы. Часть 2. Новые подходы к оценке коррозионной активности прибрежных атмосфер // *Коррозия: материалы, защита*. 2016. №1. С. 1–15.
3. Petrulin M.A., Maksaeva L.B., Yurasova T.A. et al. The effect of self-organizing vinyl siloxane nanolayers on the corrosion behavior of aluminum in neutral chloride-containing solution // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2014. Vol. 50. No. 6. P. 784–791.
4. Ерофеев В.Т., Сальникова А.И., Каблов Е.Н., Старцев О.В., Варченко Е.А. Исследование долговечности битумных композитов в условиях переменной влажности, ультрафиолетового облучения и морской воды // *Фундаментальные исследования*. 2014. №12. С. 2549–2556.
5. Sehra A.K., Whitlow W.W. 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.
6. Singha D., Ravi K., Amritap M. et al. Mechanical Characterization of C–Ph Composites Treated with Aviation Grade Fluids // *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 25. P. 159–171. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.04.019.
7. Mirzaa J., Duranda B., Bhuttab A.R., Tahirb M.M. Preferred test methods to select suitable surface repair materials in severe climates // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 50. January 15. P. 692–698. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.006.
8. Jenkins M.G., Lara-Curzio E., Gonczy S.T. Mechanical, Thermal and Environmental Testing and Performance of Ceramic Composites and Components. Philadelphia, 2000. 53 p.
9. Sitziaab F., Lisciab C., Mirãoab J. Accelerate ageing on building stone materials by simulating daily, seasonal thermo-hygrometric conditions and solar radiation of CSA Mediterranean climate // *Construction and Building Materials*. Part A. 2021. Vol. 266. DOI: 10.1016/j.conbuild-mat.2020.121009.
10. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В., Скирта А.А. Статистическая обработка результатов климатических испытаний стеклопластиков // *Пластические массы*. 2016. №3–4. С. 58–64.
11. Chena S., Youa Z., Sharifia N.P., Yaoba H., Gongac F. Material selections in asphalt pavement for wet-freeze climate zones: A review // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 201. March 20. P. 510–525. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.276.
12. Sharifia N.P., Chena S., Youa Z., Damb T.V., Gilbertsona C. A review on the best practices in concrete pavement design and materials in wet-freeze climates similar to Michigan // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2019. Vol. 6. Issue 3. P. 245–255. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.12.003.
13. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Колпачков Е.Д. Термодинамические характеристики старения полимерных композиционных материалов в условиях реальной эксплуатации // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №3 (52). С. 80–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88.
14. Луценко А.Н., Курс М.Г., Лаптев А.Б. Обоснование сроков натуральных климатических испытаний металлических материалов в атмосфере черноморского побережья. Аналитический обзор // *Вопросы материаловедения*. 2016. №3 (87). С. 126–137.
15. Koopmans S., Heusinkveld B.G., Steeneveld G.J. A standardized Physical Equivalent Temperature urban heat map at 1-m spatial resolution to facilitate climate stress tests in the Netherlands // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 213. March 20. P. 115–132. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106984.
16. Аверина А.Е., Лаптев А.Б., Нестеров А.С., Сарваева Г.А., Николаев Е.В. Применение квантово-химических параметров для оценки процессов старения полиэтилентерефталата при воздействии климата // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. №3 (60). С. 47–56. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-47-56.
17. Verbista K.M.J., Maureira-Cortésb H., Rojasb P., Vicuña S. A stress test for climate change impacts on water security: A CRIDA case study // *Climate Risk Management*. 2020. Vol. 10. Art. 100222. DOI: 10.1016/j.crm.2020.100222.
18. Николаев Е.В., Павлов М.Р., Лаптев А.Б., Пономаренко С.А. К вопросу определения сорбированной влаги в полимерных композиционных материалах // *Труды ВИАМ*. 2017. №8 (56). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-7-7.

19. Лаптев А.Б., Бугай Д.Е., Александров А.А., Ларионов В.И. Экологические и биологические факторы воздействия на сложные технические системы // *Безопасность в техносфере*. 2017. Т. 6. №4. С. 21–30.
20. Wolkoff P., Nielsen A. A new approach for indoor climate labeling of building materials – emission testing, modeling, and comfort evaluation // *Atmospheric Environment*. 1996. Vol. 30. Issue 15. P. 2679–2689. DOI: 10.1016/1352-2310(95)00323-1.
21. ASTM D2176-16. Standard Test Method for Folding Endurance of Paper and Plastics Film by the M.I.T. Tester: Active Standard (Latest Version). Last Updated November 1, 2016. URL: <https://www.astm.org/Standards/D2176.htm> (дата обращения: 19.11.2020).
22. ASTM D5870-16. Standard Practice for Calculating Property Retention Index of Plastics: Active Standard (Latest Version). Last Updated April 1, 2016. URL: <https://www.astm.org/Standards/D5870.htm> (дата обращения: 19.11.2020).
23. ASTM D3012-19. Standard Test Method for Thermal-Oxidative Stability of Polypropylene Using a Specimen Rotator Within an Oven: Active Standard (Latest Version). Last Updated May 9, 2019. URL: <https://www.astm.org/Standards/D3012.htm> (дата обращения: 19.11.2020).
24. Tourova T., Sokolova D., Nazina T., Grouzdev D., Kurshev E., Laptev A. Biodiversity of microorganisms colonizing the surface of polystyrene samples exposed to different aqueous environments // *Sustainability*. 2020. Т. 12. No. 9. Art. 3624. DOI: 10.3390/su12093624.
25. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Куршев Е.В., Горяшник Ю.С. Особенности биодеструкции термопластов на основе полиэфиров в различных климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2019. №7 (79). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-84-91.
26. Коган А.М., Николаев Е.В., Голубев А.В., Лаптев А.Б., Мовенко Д.А. Этапы биообрастания и коррозии стали в Черноморской воде // *Труды ВИАМ*. 2019. №6 (78). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-84-94.
27. ASTM D6954-18. Standard Guide for Exposing and Testing Plastics that Degrade in the Environment by a Combination of Oxidation and Biodegradation: Active Standard (Latest Version). Last Updated March 13, 2018. URL: <https://www.astm.org/Standards/D6954.htm> (дата обращения: 19.11.2020).
28. ASTM D6400-19. Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities: Active Standard (Latest Version). Last Updated June 4, 2019. URL: <https://www.astm.org/Standards/D6400.htm> (дата обращения: 19.11.2020).
29. ASTM D7991-15. Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastics Buried in Sandy Marine Sediment under Controlled Laboratory Conditions: Active Standard (Latest Version). Last Updated September 1, 2015. URL: <https://www.astm.org/Standards/D7991.htm> (дата обращения: 19.11.2020).
30. STP533. Disposal of Plastics with Minimum Environmental Impact. URL: https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/SOURCE_PAGES/STP533_foreword.pdf (дата обращения: 19.11.2020).
31. ASTM F2759-19. Standard Guide for Assessment of the Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Used in Orthopedic and Spinal Devices: Active Standard (Latest Version). Last Updated February 6, 2020. URL: <https://www.astm.org/Standards/F2759.htm> (дата обращения: 19.11.2020).
32. ASTM D5338-15. Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions, Incorporating Thermophilic Temperatures: Active Standard (Latest Version). Last Updated June 1, 2015. URL: <https://www.astm.org/Standards/D5338.htm> (дата обращения: 19.11.2020).
33. ASTM E2317-04. Standard Guide for Conducting Renewal Microplate-Based Life-Cycle Toxicity Tests with a Marine Meiobenthic Copepod: Active Standard (Latest Version). Last Updated December 1, 2012. URL: <https://www.astm.org/Standards/E2317.htm> (дата обращения: 19.11.2020).
34. ASTM E1562-00. Standard Guide for Conducting Acute, Chronic, and Life-Cycle Aquatic Toxicity Tests with Polychaetous Annelids: Active Standard (Latest Version). Last Updated March 1, 2013. URL: <https://www.astm.org/Standards/E1562.htm> (дата обращения: 19.11.2020).
35. ASTM D7475-20. Standard Test Method for Determining the Aerobic Degradation and Anaerobic Biodegradation of Plastic Materials under Accelerated Bioreactor Landfill Conditions: Active Standard (Latest Version). Last Updated March 6, 2020. URL: <https://www.astm.org/Standards/D7475.htm> (дата обращения: 19.11.2020).