

УДК 620.1

А.Б. Лантев¹, С.Л. Барботько¹, Е.В. Николаев¹

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СОХРАНЯЕМОСТИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561

Приведены результаты, полученные за последние годы в направлении реализации следующих стратегических направлений:

– *оценка экономических потерь от воздействия агрессивных климатических факторов и разработка мероприятий по их снижению;*

– *изменение агрессивности природной среды за счет промышленных выбросов и загрязнений, увеличения объемов эксплуатируемой техники и инфраструктуры, а также глобального изменения климата Земли;*

– *актуальность решения задач, связанных с воздействием климатических факторов, сформулированных в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», разработанных во ФГУП «ВИАМ»;*

– *комплексное изучение процессов биокоррозии в морском климате с точки зрения их влияния на служебные характеристики материалов;*

– *прогнозирование изменения служебных характеристик материалов, конструкций и сложных технических систем с учетом воздействия климатических и эксплуатационных факторов;*

– *актуализация российской нормативной базы оценки влияния внешних воздействующих факторов и эксплуатационных нагрузок на служебные характеристики материалов, конструкций и сложных технических систем, гармонизированной с международными стандартами;*

– *создание климатических площадок в климатических зонах, отсутствующих в Российской Федерации;*

– *перспективы дальнейшего развития направлений научных и практических исследований климатической стойкости материалов на период до 2030 года.*

Ключевые слова: *коррозия, старение, биоповреждения, полимерные композиционные материалы, климатические испытания.*

¹ Федеральное 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

A.B. Laptev, S.L. Barbotko, E.V. Nikolaev

The main research areas of the persistence properties of materials under the influence of climatic and operational factors

The article presents the results obtained in recent years for implementation of the following strategic directions:

– assessment of economic losses from aggressive climatic factors and development of measures to reduce them;

– change of the aggressiveness of natural environment due to industrial emissions and waste, increasing the volume of operating equipment and infrastructure, as well as global changes in the Earth's climate;

– urgency of the tasks related to climatic factors stated in the «Strategic directions of development of materials and technologies of their reprocessing for the period till 2030», developed by FSUE «VIAM»;

– comprehensive study of the processes of bio-corrosion in maritime climate from the point of view of their influence on the performance characteristics of materials;

– predicting changes in performance of materials, structures and complex technical systems taking into account climatic and operational factors;

– updating the Russian regulatory base for the assessment of the impact of external influencing factors and working loads on the performance characteristics of materials, structures and complex technical systems harmonized with international standards;

– creation of climatic stations in climate zones which are absent in the Russian Federation;

– prospects of the further development directions of scientific and practical investigations of the climatic resistance of materials for the period up to 2030.

Keywords: *corrosion, aging, biodeterioration, polymer composite materials, environmental testing.*

Работа выполнена в рамках реализации стратегического направления 18. «Климатические испытания для обеспечения безопасности и защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов, конструкций и сложных технических систем в природных средах» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

На прошедших форумах специалистов по климатическим испытаниям материалов и изделий в рамках конференций, проводимых во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ) и в его Геленджикском центре климатических испытаний, выработаны основные направления развития климатических испытаний материалов, конструкций и сложных технических систем.

В данной статье представлены главные из этих направлений и дана краткая аннотация полученных научных заделов.

Оценка экономических потерь от воздействия агрессивных климатических факторов и разработка мероприятий по их снижению

По проблемам защиты от коррозии, старения и биоповреждения материалов, изделий и конструкций в РФ разработано большое количество государственных и отраслевых документов, благодаря которым количество аварий на опасных производствах значительно сократилось [2–4]. Разработаны основные нормативы применения средств защиты от коррозии, старения и биоповреждения [5], их тестирования и применимости. Однако это сделано по отношению к оборудованию, подверженному коррозии под воздействием искусственных коррозионно-активных сред, в химической и атомной промышленности, нефтяной, энергетической и газовой отраслях, морском и трубопроводном транспорте. Коррозия же в атмосфере под действием климатических факторов происходит медленнее и ее последствия не приводят к масштабным катастрофам и не так опасны для жизни и здоровья людей и экологии, однако в масштабах страны именно деградация материалов под действием климатических факторов приводит к многомиллиардным потерям [6].

Наиболее важным этапом в создании техники является назначение ее климатического исполнения. Климатическое исполнение показывает, в каком климате и при каком воздействии внешних факторов может работать тот или иной материал или изделие в течение длительного периода времени [5, 7–9].

Экономические расчеты показывают, что предупреждение разрушений, аварий и катастроф обходится значительно дешевле, чем их ликвидация. Во всем мире особое внимание уделяется процессам квалификации материалов и мониторингу состояния конструкций и оборудования для технологических процессов [10–13]. В наиболее полном и подробно регламентирующем испытании, эксплуатацию и хранение изделий техники стандарте США (MIL-STD-810G) приведены перечни испытаний для различных видов техники, методы испытаний, разбивка территории земного шара на климатические зоны и назначены экстремальные пункты для каждой из них. Территория РФ по ГОСТ 16350 делится на 14 климатических зон, по ГОСТ 9.039 количество представительных пунктов коррозионной агрессивности атмосферы – более 60.

Важным этапом реализации мероприятий по снижению потерь от процессов коррозии, старения и биоразрушения является разработка методик и соответствующих нормативных документов по проведению климатических испытаний.

Изменение агрессивности природной среды за счет промышленных выбросов и загрязнений, увеличения объемов эксплуатируемой техники и инфраструктуры, а также глобального изменения климата Земли

В работах [14, 15] проведен анализ коррозионной агрессивности атмосферы и ее изменения в период с 1986 по 2007 г.

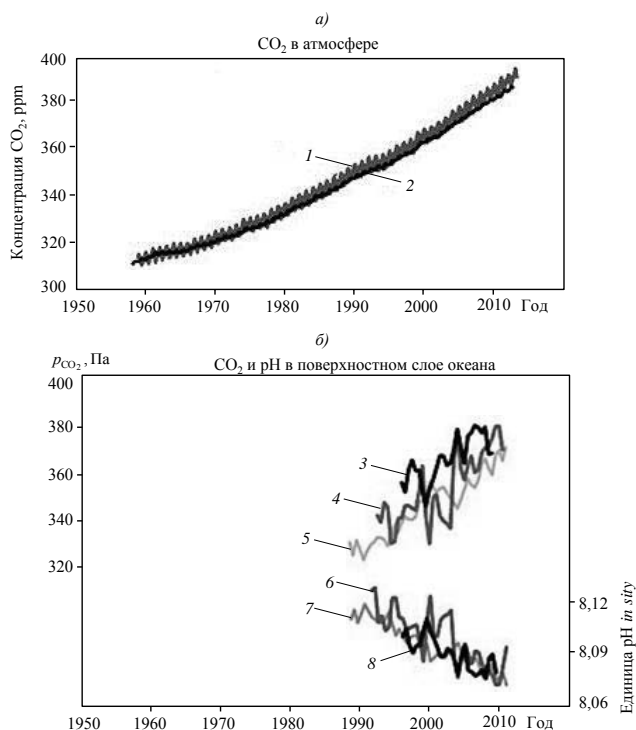
В 1986 г. для изделий из стали 20 категория агрессивности С2 по международному стандарту ISO 9223 имеет место практически на всей территории РФ (94%). Коррозионные потери в интервале низких значений ($10\text{--}50\text{ г/м}^2$) наблюдаются на 53%, тогда как наиболее высокие ($250\text{--}400\text{ г/м}^2$), характерные для промышленных районов, возможны только на 2% территории РФ. Существенное уменьшение к 1990 г. загрязненности атмосферы городов и промышленных районов привело к уменьшению территории с более высокими значениями коррозии. В результате годовая коррозия в интервале значений $10\text{--}50\text{ г/м}^2$ предполагается на 59%, а в интервале $250\text{--}400\text{ г/м}^2$ – всего на 1% территории РФ.

В связи с температурной поправкой и уменьшением загрязненности атмосферы для 2003 и 2007 гг. заметно уменьшение территорий со скоростью коррозии стали 20 $>100\text{ г/м}^2$, а интервал $250\text{--}400\text{ г/м}^2$ отсутствует. Площади с коррозионными потерями $10\text{--}30\text{ г/м}^2$ уменьшились, за счет чего увеличились территории со скоростью коррозии стали 20 в интервалах $30\text{--}50$ и $50\text{--}100\text{ г/м}^2$. В 2007 г. всю территорию РФ по коррозионной стойкости изделий из стали 20 можно отнести к категории С2 по ISO 9223.

Кроме изменения коррозионной агрессивности (снижения рН) воды, происходит изменение климата (см. рисунок), приводящее к увеличению средней температуры, повышению уровня моря и сокращению площади снежного покрова, к повышению скорости ветров. Увеличивающееся количество природных катаклизмов (наводнений, штормов, ураганных ветров и ливневых дождей) предполагает увеличение механических нагрузок на отдельные элементы и детали сложных технических систем при одновременном ускорении процессов коррозии, старения и биоповреждения. Природные изменения требуют прогнозирования сохраняемости свойств материалов и все более актуальным становится предварительное проведение климатических испытаний материалов, изделий и сложных технических систем [4].

Актуальность решения задач, связанных с воздействием климатических факторов, сформулированных в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», разработанных во ФГУП «ВИИМ»

На структуру и свойства материалов существенное влияние оказывают климатические факторы при хранении и эксплуатации техники. К таким факторам по ГОСТ 26883–86 относятся атмосферные осадки, морской туман, пыль и песок, коррозионно-активные агенты морской воды и почвенно-грунтовой среды, тепловой удар, атмосферное давление, солнечное излучение и др.



Многочисленные наблюдаемые показатели изменяющегося глобального углеродного цикла:

а – атмосферная концентрация CO₂ по данным обсерватории «Мауна Лоа» (19°32' с. ш., 155°34' з. д. – 1) и на Южном полюсе (89°59' с. ш., 24°48' з. д. – 2) с 1958 г.; *б* – парциальное давление (*p*) растворенного CO₂ на поверхности океана (3–5) и pH по месту нахождения (6–8) – мера подкисления океанской воды. Данные измерений с трех станций: в Атлантическом (29°10' с. ш., 15°30' з. д. – кривая 3/кривая 6; 31°40' с. ш., 64°10' з. д. – кривая 4/кривая 8) и Тихом (22°45' с. ш., 158°00' з. д. – кривая 5/кривая 7) океанах [16]

Проектирование современных воздушных судов по принципу «безопасного повреждения» допускает появление повреждения конструкции и его развитие в процессе эксплуатации до не критических размеров. Во время эксплуатации это повреждение должно быть обнаружено, а конструкция отремонтирована. Такой подход требует многопутной (статически неопределимой) конструкции, где силовые элементы подстраховывают друг друга, и подразумевает использование материалов с высокими характеристиками сопротивления развитию повреждаемости и разрушению, гарантирующими межремонтный срок эксплуатации. С целью определения оптимального, контролируемого при эксплуатации критерия

разрушения рассмотрены перспективы применения метода акустической эмиссии при оценке повреждаемости материалов в условиях воздействия климата [17, 18].

Факторы, влияющие на работоспособность элементов технических устройств, могут быть классифицированы [19] по следующим признакам: вид материала, точка максимального воздействия и протекания процессов, вызывающих изменение свойств и состояния материала и элемента конструкции; энергия, определяющая характер процесса; типы эксплуатационного воздействия, возникающие только в условиях активной работы элементов и существующие независимо от того, работают они или выключены; механизм протекания процессов.

Для учета воздействия климатических и внешних воздействующих факторов (коррозия, старение и биоповреждение) в настоящее время приняты два основных вида климатических испытаний изделий и образцов материалов – это *натурные климатические* испытания на открытых площадках климатических станций, находящихся в различных климатических поясах, позволяющие оценить изменение свойств материалов в реальных условиях, и *ускоренные (лабораторные)* испытания на воздействие коррозии, старения и биоповреждения, которые позволяют оценить стойкость сплавов и полимерных композиционных материалов (ПКМ) при воздействии искусственно созданных факторов окружающей среды. Для установления механизма разрушения в металлических материалах при натурной экспозиции необходимо проведение длительных испытаний – до 10–15 лет [20, 21], для ПКМ – до 15 лет. Результаты по скорости и механизму разрушения металла при коррозионном воздействии в условиях ускоренных испытаний можно получить в течение 0,5–1 года [5], при этом, как правило, занижается прогнозный срок безопасной эксплуатации материалов и таких изделий, как воздушное судно (20 лет службы). Ресурс планера воздушного судна в период его эксплуатации продлевается «по состоянию», при условии тщательной диагностики и проведения ремонтных работ в условиях авиаремонтного предприятия [22, 23], и может поэтапно достигать 45–50 лет. Для материалов, планируемых к применению в изделиях всеклиматического исполнения (по ГОСТ 15150–68), отсутствие прямых данных по климатической стойкости в условиях различных климатических зон не позволяет обеспечить продление ресурса изделия в процессе длительной эксплуатации [24–26].

Авиационные правила АП-25 [27] включают пункт 571: «Оценка прочности, уровня проектирования и качества производства должна показать, что аварийной или катастрофической ситуации из-за усталости, *коррозии*, дефектов производства или случайного повреждения можно избежать в течение всего времени эксплуатации самолета».

Получение точных значений сохраняемости свойств и механических характеристик материалов во многом определяет значение коэффициента запаса прочности для отдельных узлов, агрегатов и изделия в целом. Снижение коэффициента запаса прочности приводит к значительному снижению массы воздушного судна и, как следствие, к увеличению грузоподъемности и повышению эффективности эксплуатации авиационной техники.

Для реализации направления разработана программа комплексных исследований материалов, которая позволит получать сведения о климатической стойкости материалов при одновременном воздействии климатических и эксплуатационных факторов. Данная методика включает использование неразрушающего контроля роста повреждений (трещин) образцов в напряженном состоянии, экспонирующихся на климатической площадке, в камере или морском стенде.

Комплексное изучение процессов биокоррозии в морском климате с точки зрения их влияния на служебные характеристики материалов

Вопросам биокоррозии и биоповреждения материалов уделяется достаточно много внимания, поэтому разработаны основные методы оценки биоповреждений материалов. В работах [28–30] отражены основные подходы к изучению влияния потенциала поверхности, ингибиторов коррозии, лакокрасочных и гальванических покрытий на развитие локальных видов коррозии, что дает понимание механизмов биокоррозии металлов [31–33]. Так, в рамках Центра коллективного пользования ФГУП «ВИАМ» оценку формирования сообщества биообрастателей и биодеструкторов проводили на металлах марок М1, 30ХГСА с цинковым покрытием, Д19-АТ и Д19-АТ с покрытием и на их сочетаниях с пластинами углепластиков марок ВКУ-27л и ВКУ-27 с плакирующим слоем после экспонирования в акватории ГЦКИ ВИАМ в течение 6 мес (май–октябрь 2015 г.). Экспозицию образцов проводили в одном горизонте воды на глубине 2 м. Скорость формирования сообществ обрастания связана с такими параметрами морской воды, как температура, соленость и рН, поэтому в районе исследования еженедельно проводили измерения данных параметров.

В результате проведенных исследований установлено, что на всех представленных образцах (за исключением пластины из меди М1) обнаружены: мшанки *Lepralia pallasiana* Moll, моллюски *Mytilus acrocyrta* Locard, кольчатые черви *Prostomatella arenicola* Friedrich, рачки рода *Balanus* sp. *Da Costa*, представители коричневых водорослей рода *Ectocarpus* sp. *Lyngb.* и водорослей класса *Chlorophyceae* Kutz.

Прогнозирование изменения служебных характеристик материалов, конструкций и сложных технических систем с учетом воздействия климатических и эксплуатационных факторов

Задача прогнозирования ресурса сводится к точному знанию изменения во времени характеристик прочности материалов, применяемых для создания воздушного судна. От статистической точности полученных экспериментально характеристик прочности материала зависит значение коэффициентов запаса прочности (K_3) при расчетах отдельных деталей, агрегатов и узлов, поэтому задача получения прогнозных характеристик материалов в период всего жизненного цикла воздушного судна является наиболее важным показателем. В конечном счете прогнозирование сводится к определению времени до наступления предельного состояния материала.

При проведении оценки должны быть использованы соответствующие коэффициенты K_3 [34], которые представляют собой произведение следующих коэффициентов, учитывающих:

- $K_{3,p}$ – производственные отклонения свойств материала от партии к партии;
- $K_{3,x}$ – разброс характеристик материала до образования трещины и в период ее развития;
- $K_{3,c}$ – изменения в спектрах нагружения;
- $K_{3,t}$ – период развития трещины;
- $K_{3,a}$ – влияние фактора температуры и атмосферы окружающей среды.

Снижение каждого из коэффициентов возможно путем получения более точных и статистически значимых характеристик материалов, их изменения во времени и интервалов варьирования свойств.

Снижение значений K_3 путем повышения точности измерений характеристик материала является наиболее важной задачей при выполнении климатических испытаний. В работе [35] приведено минимальное количество параллельных опытов, которое позволяет получить статистически значимые интервалы варьирования – например, предела прочности ПКМ при изгибе.

Как показано в работе [35] проведение нескольких сотен параллельных экспериментов свидетельствует о технической сложности получения точных (с интервалами варьирования 1–2%) измерений механических характеристик при климатических испытаниях. Однако эти результаты могут быть получены без изменения количества параллельных экспериментов, а в результате уменьшения погрешностей получения результатов – например, при использовании для фиксации роста трещины в образце при статическом нагружении в коррозионной атмосфере видеокамер или (что представляется наиболее перспективным и экономически целесообразным) при применении датчиков акустической эмиссии.

Механические испытания образцов материалов после проведения климатических испытаний вносят погрешность в пределах 3%, собственно

климатические испытания: 7–20%. Большую долю в погрешность измерений вносит период снятия и постановки образцов по годам, так как от года к году изменяются параметры температуры, влажности, количества осадков, солнечной радиации. Они сильно влияют на процессы влагонасыщения и старения ПКМ и искажают реальные результаты измерения прочности.

С учетом того, что любое измерение или расчетное значение имеет свои погрешности и интервалы варьирования результатов, разработчик материала должен предоставить данные о характеристиках материала, с заданной степенью точности спрогнозировать изменение свойств материала в зависимости от периодичности воздействия климатических факторов на этапе хранения и эксплуатационных факторов на этапе функционирования изделия – например, полета воздушного судна.

Для оценки возможности прогнозирования сохраняемости такой механической характеристики углепластика КМУ-4т-2м, как предел прочности при сжатии, были взяты данные из справочника [36]. Состав и структура углепластика марки КМУ-4т-2м: связующее ЭНФБ-2М, наполнитель – тканая углеродная однонаправленная лента УОЛ-300-2-3к-62-ЭД. Углепластик КМУ-4т-2м рекомендуется для изготовления ответственных элементов адаптирующихся конструкций законцовки крыла, стабилизаторов, широкохордных крупногабаритных лопаток вентилятора ГТД, гибридных конструкций и может эксплуатироваться при температурах от -60 до +80°С.

Анализ данных за трехгодичную экспозицию образцов в различных климатических зонах проведен с помощью регрессионного анализа [37, 38] на основании наиболее информативных признаков. Изначальные справочные данные об условиях (см. таблицу) линейно нормировали от -1 до 1 в признаки X_1, \dots, X_5 . Предсказываемую (зависимую) величину определяли на основании данных таблицы как среднее изменение предела прочности при изгибе y :

$$y = \sqrt{N \frac{\sigma_N}{\sigma}}, \quad (1)$$

где σ_N – предел прочности при изгибе после N лет экспозиции; σ – исходный предел прочности при изгибе; N – количество лет.

Отбор признаков осуществляли на основании корреляционного анализа данных: признаки X_2 и X_3 отбросили из рассмотрения из-за высокой корреляции с признаком X_4 , признак X_5 отбросили из-за низкой корреляции с изменением предела прочности y . Параметры регрессионной модели автоматически рассчитали с помощью метода наименьших квадратов.

**Данные для расчета сохраняемости свойств углепластика КМУ-4т-2м
на основе справочных данных**

Населенный пункт	Средняя температура	X1	Влажность воздуха	X2	Число дней (низкая облачность)			X3	Норма осадков	X4	Скорость ветра	X5
					ясных	облачных	пасмурных					
Сочи	14,20	0,97	75	0,11	125	172	68	-0,30	1703	0,55	1,70	-1,00
Москва	5,80	0,25	78	0,53	77	185	103	-1,00	708	-0,50	1,38	-1,43
Якутск	-8,80	-1,00	68	-1,00	215	139	11	1,00	238	-1,00	1,73	-0,96
Одесса (Геленджик)	10,70	0,67	75	0,09	147	173	45	0,01	453	-0,77	3,18	1,00
Батуми	14,50	1,00	81	1,00	147	173	45	0,01	2131	1,00	2,50	0,08

В результате расчетов получено уравнение зависимости предела прочности при изгибе углепластика КМУ-4т-2м в течение одного года при воздействии климатических (20 ч) и эксплуатационных факторов (4 ч):

$$y=0,963+0,011X1+0,029X4. \quad (2)$$

С использованием этой регрессионной модели выведено прогнозируемое значение предела прочности в зависимости от времени и климатических условий. Так, если исходный предел прочности образца равен 690 МПа, то после N лет эксплуатации в условиях, описанных признаками $X1$ и $X4$, изменение предела прочности получим, преобразовав формулу (1) в вид $\sigma_N=y^N\sigma$.

Оценка результатов, полученных экспериментально и с использованием регрессионной модели (2), показала, что уровень отклонений при климатических испытаниях не превышает 11%.

Таким образом, показано, что целенаправленное планирование эксперимента, нацеленного на получение прогнозного результата, позволит разработать математическую модель изменения свойств материала во времени в зависимости от периодичности воздействия и величины климатических и эксплуатационных факторов.

Актуализация Российской нормативной базы оценки влияния внешних воздействующих факторов и эксплуатационных нагрузок на служебные характеристики материалов, конструкций и сложных технических систем, гармонизированной с международными стандартами

За период с 2012 по 2015 г. для реализации поставленных в работе [1] целей и задач по климатическим испытаниям, разработана нормативная документация:

– СТО 1-595-20-422–2012 «Определение коэффициента диффузии и предельного влагосодержания в углепластике»;

– ММ1.595-20-450–2014 «Проведение тепловлажностных испытаний угле- и стеклопластиков на основе связующих ВСЭ-1212 и ВСТ-1208»;

– ММ1.595-20-461–2015 «Проведение теплового старения для оценки ресурса работы ПКМ на основе связующих ВСЭ-1212 и ВСТ-1208»;

– ММ1.595-20-467–2015 «Методика оценки сохраняемости свойств ПКМ для прогнозирования ресурса материалов деталей мотогондолы двигателя ПД-14»;

– ММ1.595-20-470–2015 «Методика лабораторной оценки стойкости неметаллических материалов, предназначенных для хранения и эксплуатации в зоне арктического и субарктического климатов»;

– ТР1.2.2281-2012 «Предотвращение микробиологического поражения топлива ТС-1 и материалов топливных систем»;

– ТР1.2.2315–2013 «Уход в эксплуатации и профилактическое обслуживание зон авиационной техники, наиболее подверженных микробиологическому поражению»;

– СТО 1-595-20-441–2014 «Использование тест-культур при испытаниях неметаллических материалов на микробиологическую стойкость»;

– ММ1.595-20-453–2014 «Определение эффективности дезинфицирующих средств, применяемых для защиты материалов топливных систем от микробиологического поражения»;

– СТО 1-595-20-470–2015 «Методы испытаний неметаллических материалов на воздействие плесневых грибов»;

– ММ1.595-20-464–2015 «Определение сохраняемости защитных свойств дезинфицирующих средств, применяемых для защиты материалов топливных систем от микробиологического поражения».

Создание климатических площадок в климатических зонах, отсутствующих в Российской Федерации

Ведутся переговоры и готовится оборудование для создания площадок в сотрудничестве с Центром экологических исследований в г. Сьенфуэгос (СЕАС, Куба) по созданию климатической станции в агрессивном тропическом климате и с «Ваннинг Центром» Китайского климатического центра испытаний и исследований (China Weathering Test & Research) при Южно-западном исследовательском институте техники и прикладной науки (SRITE) на острове Хайнань – в субэкваториальном климате.

Перспективы развития

Для развития исследований климатической стойкости материалов на период до 2030 г. планируется дальнейшее развитие направлений:

– автоматизированного неразрушающего контроля с вероятностной оценкой достоверности результатов контроля для исследования структуры и процессов, протекающих в материалах при их хранении и эксплуатации, с применением электромагнитных и акустических полей;

– разработка методов количественной оценки состояния поверхности и физико-механических характеристик материалов на всех стадиях развития процессов коррозии, старения и биоповреждений;

- исследование биокоррозии и биодеструкции материалов в представительных и экстремальных пунктах климатических зон земного шара;
- разработка методологии прогнозирования и математических моделей сохраняемости свойств материалов и элементов конструкций с учетом средств комплексной противокоррозионной защиты металлов, лакокрасочных покрытий для ПКМ и их работоспособности в климатических условиях по ГОСТ 15150.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1. С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Бедрицкий А.И. Результаты исследований климата для стратегии устойчивого развития Российской Федерации. М.: Вива-Стар, 2005. 178 с.
3. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
4. Ибрагимов Н.Г., Лаптев А.Б., Хафизов А.Р. и др. Осложнения в нефтедобыче. Уфа: Монография, 2003. 302 с.
5. Полякова А.В., Кривушина А.А., Горяшник Ю.С., Яковенко Т.В. Испытания на микробиологическую стойкость в условиях теплого и влажного климата // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №7. Ст. 06. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 05.04.2016).
6. Koch G.H., Brongers M.P.H., Thompson N.G. et al. Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States // NACE Corrosion Wrap-Up report, 2010. 19 p. Publication No. FWHA-RD-01-156. URL: <http://www.nace.org> (дата обращения: 05.04.2016).
7. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ, 2001. Вып.: Методы испытаний и контроля качества металлических и неметаллических материалов. С. 3–8.
8. СНиП 28.13330.2012. Защита строительных конструкций от коррозии. М., 2012. 54 с.
9. Руководящий документ по защите от коррозии механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений: РД ГМ-01-02: утв. М-вом энергетики Рос. Федерации 21.03.2002. URL: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/46/46115/ (дата обращения: 05.04.2016).

10. Ахияров Р.Ж., Бугай Д.Е., Лаптев А.Б. Проблемы подготовки оборотных и сточных вод предприятий нефтедобычи // Нефтепромысловое дело. 2008. №9. С. 61–65.
11. Ахияров Р.Ж., Лаптев А.Б., Ибрагимов И.Г. Повышение промышленной безопасности эксплуатации объектов нефтедобычи при биозаражении и выпадении солей методом комплексной обработки пластовой воды // Нефтепромысловое дело. 2009. №3. С. 44–46.
12. Ахияров Р.Ж., Матвеев Ю.Г., Лаптев А.Б., Бугай Д.Е. Ресурсосберегающие технологии предотвращения биозаражения пластовых вод предприятий нефтедобычи // Нефтегазовое дело. 2011. №5. С. 232–242. URL: <http://ogbus.ru/article/resursosbergayushhie-technologii-predotvrashheniya-biozarazheniya-plastovykh-vod-predpriyatij-neftedobychi/> (дата обращения: 05.04.2016).
13. Лаптев А.Б., Луценко А.Н., Курс М.Г., Бухарев Г.М. Опыт исследований биокоррозии металлов // Практика противокоррозионной защиты. 2016. №2 (80). С. 36–57.
14. Михайлов А.А., Жирнов А.Д., Жиликов В.П. и др. Коррозивность приморских атмосфер // Коррозия: материалы, защита. 2009. №9. С. 1–6.
15. Михайлов А.А., Панченко Ю.М., Игонин Т.Н. и др. Атмосферная коррозия углеродистой стали: моделирование и картографирование территории Российской Федерации // Коррозия: материалы, защита. 2010. №11. С. 1–10.
16. Кокорин А.О. Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК. М.: Всемирный фонд дикой природы, 2014. 80 с.
17. Луценко А.Н., Курс М.Г., Лаптев А.Б. Обоснование сроков натуральных климатических испытаний металлических материалов в атмосфере черноморского побережья // Вопросы материаловедения, 2016. №3 (87). С. 126–137.
18. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
19. Меламедов И.М. Физические основы надежности. Л.: Энергия. 1970. 152 с.
20. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.
21. Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods // Ultrasound. Kaunas: Technologija. 2006. №2. P. 7–10.

22. Курс М.Г., Лаптев А.Б., Кутырев А.Е., Морозова Л.В. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях. Часть 1 // Вопросы материаловедения. 2016. №1 (85). С. 116–126.
23. Лаптев А.Б., Луценко А.Н., Перов Н.С., Бухарев Г.М. Опыт исследований биокоррозии металлов // Практика противокоррозионной защиты. №2 (80). 2016. С. 36–57.
24. Лаптев А.Б., Навалихин Г.П. Повышение безопасности эксплуатации промышленных нефтепроводов // Нефтепромышленное дело. 2006. №1. С. 48–52.
25. Лаптев А.Б., Мовенко Д.А. Исследование причин коррозионного разрушения медных трубок системы холодоснабжения // Практика противокоррозионной защиты. №3 (81). 2016. С. 29–35.
26. Ахияров Р.Ж., Лаптев А.Б., Мовенко Д.А., Белова Н.А. Исследование аномально низкой коррозионной стойкости трубной стали теплообменной аппаратуры для нефтепереработки // Нефтяное хозяйство. 2016. №1. С. 118–121.
27. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №10. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.02.2016).
28. Арабей Т.И., Белоглазов С.М. Улучшение защитного действия грунта-модификатора ржавчины на сталь, корродирующую в морской воде и под действием *Aspergillus niger* // Практика противокоррозионной защиты. 2010. Вып. 1 (55). С. 17–22.
29. Реформатская И.И., Подобаев А.Н., Ащеулова И.И. и др. Локальная коррозия сталей в условиях эквипотенциальности поверхности // Практика противокоррозионной защиты. 2011. Вып. 3 (61). С. 55–63.
30. Герасименко А.А. Биокоррозия и защита металлоконструкций. 2. Микробная коррозия оборудования нефтяной промышленности // Практика противокоррозионной защиты. 2001. №2. С. 35–36.
31. Лаптев А.Б., Луценко А.Н., Перов Н.С., Бухарев Г.М. Опыт ФГУП «ВИАМ» по исследованию биокоррозии в морской воде // Трубопроводный транспорт (теория и практика). 2016. №4 (56). С. 28–31.
32. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В., Скирта А.А. Обработка результатов климатических испытаний стеклопластиков // Пластические массы. 2016. №3–4. С. 58–62.
33. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я. и др. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.

34. Ерасов В.С. Физико-механические характеристики как основные интегральные показатели качества авиационных конструкционных материалов: метод. пособие. М.: ВИАМ, 2011. 16 с.
35. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.
36. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. Т. 13: Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. 270 с.
37. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Нью-Йорк: Вильямс, 2007. 912 с.
38. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.