

УДК 620.193

*Е.В. Николаев¹, А.В. Славин¹, В.О. Старцев¹, А.Б. Лантев¹***СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА МАТЕРИАЛЫ И СЛОЖНЫЕ
ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (к 120-летию Г.В. Акимова)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-117-130

Основоположителем науки о защите материалов от коррозии, старения и биоповреждения в Советской России является Георгий Владимирович Акимов, который создал инфраструктуру климатических испытаний материалов и изделий. В настоящее время его учениками и последователями открыты новые направления развития климатических и микробиологических испытаний – это исследования сохраняемости свойств материалов в составе сложных технических систем при воздействии климатических факторов, плесневых грибов, бактерий и эксплуатационных нагрузок самыми современными методами на площадках создаваемой сети станций климатических испытаний, а также с использованием современной нормативной документации.

Ключевые слова: коррозия металлов и бетонов, старение полимерных материалов, биоповреждение материалов, климатические испытания, бактерии, микромицеты, секвенирование, прогнозирование свойств материалов.

*E. V. Nikolaev¹, A. V. Slavin¹, V. O. Startsev¹, A. B. Laptev¹***MODERN APPROACHES TO ASSESSING THE IMPACT
OF EXTERNAL FACTORS ON MATERIALS AND COMPLEX
TECHNICAL SYSTEMS (to the 120th anniversary of G.V. Akimov)**

The founder of the science of protecting materials from corrosion, aging and bio-damage in Soviet Russia is Georgy Vladimirovich Akimov, who created the infrastructure for climate testing of materials and products. Currently, his students and followers have discovered new directions for the development of climatic and microbiological tests – these are studies of the preservation of the properties of materials in complex technical systems under the influence of climatic factors, mold fungi, bacteria and operational loads using the most modern methods at the sites of the created network of climate test stations, as well as using modern regulatory documentation.

Keywords: corrosion of metals and concrete, aging of polymer materials, bio-damage of materials, climatic tests, bacteria, micromycetes, sequencing, prediction of material properties.

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

Вопрос стойкости материалов, изделий, конструкций и их частей к воздействию внешних факторов является одним из важнейших и занял особое место еще в начале XX в., когда получило развитие станко- и машиностроение, началось промышленное производство материалов, изделий, строительных конструкций и появилась необходимость оценки их долговечности в тех или иных условиях, разработки методов защиты, определения сроков замены и ремонта изделий.

Перед специалистами в области коррозии, старения и биоповреждения поставлены задачи по совершенствованию имеющихся методов и созданию новых подходов к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы, а также методов их защиты.

История и развитие методов климатических испытаний

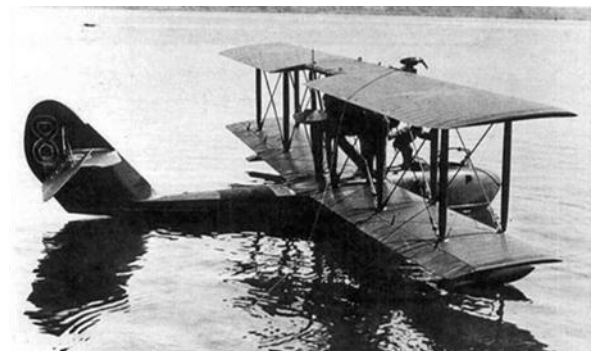
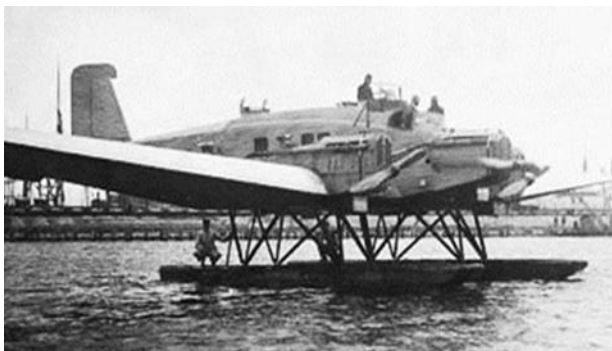
Первым, кто в нашей стране начал системно заниматься вопросами защиты материалов и изделий от коррозии, стал член-корреспондент Академии наук СССР, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР Георгий Владимирович Акимов, которого считают основателем советской науки о коррозии металлов и сплавов [1–5].



Георгий Владимирович Акимов (1901–1953)

23 апреля 2021 г. исполнилось 120 лет со дня рождения Георгия Владимировича Акимова – автора более 250 научных трудов по проблемам коррозии металлов, лауреат Сталинской премии – 1945, 1946, 1949 гг., премии АН СССР им. Д.И. Менделеева – 1952 г.; он награжден двумя орденами Ленина – 1945, 1946 гг., орденом Трудового Красного Знамени – 1949 г., медалями.

Во второй половине 1920-х гг. специалистами в области военной и гражданской авиации было обращено внимание на гидросамолеты, способные садиться на водную поверхность с целью дозаправки в океане судов и подлодок. В 1927 г. проведены первые исследования протекторной защиты на гидросамолетах.



Первые опыты с протекторной защитой на гидросамолетах

В 1928–1929 гг. Р.Л. Бартини совместно с В.О. Кренигом и Г.В. Акимовым разработал метод защиты поплавков гидросамолетов из алюминиевых сплавов от коррозии при помощи цинковых протекторов (в специальной научно-технической литературе тех лет утверждалось, что осуществление подобной защиты невозможно) [6].

Впоследствии работы Р.Л. Бартини были продолжены Г.В. Акимовым. В 1945 г. вышла книга Г.В. Акимова «Теория и методы исследования коррозии металлов», которая положила начало развитию науки о коррозии в нашей стране.

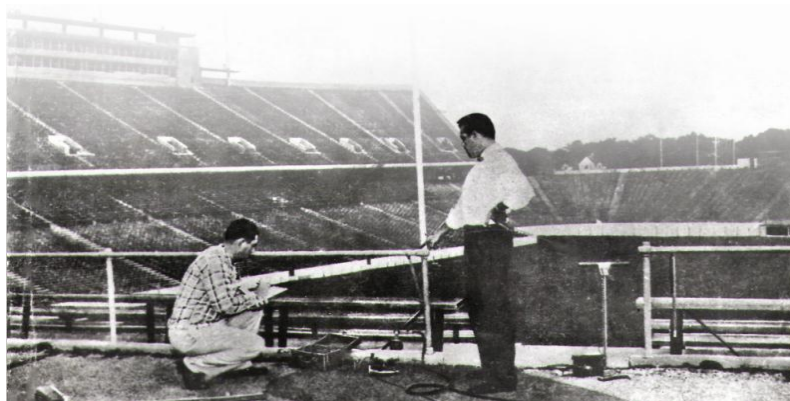


Роберт Людвигович Бартини
(1897–1974)



Книга Г.В. Акимова «Теория и методы
исследования коррозии металлов»

Георгий Владимирович Акимов уделял особое внимание экспериментальному подтверждению теоретических основ механизмов коррозии и проводил длительные натурные испытания – сначала на плавучем стенде в г. Севастополе, затем на Дальнем Востоке и на Азовском побережье г. Мариуполя. По инициативе Г.В. Акимова руководством страны принято решение о создании сети климатических станций, в которую в дальнейшем входило 13 станций.



Г.В. Акимов на климатической станции в г. Звенигороде

В 1943 г. создана коррозионная станция в п. Чакви площадью 0,3 га, которая просуществовала до 1973 г., а затем стала являться Батумским филиалом ВИАМ.

Созданный в п. Чакви Батумский филиал ВИАМ был оснащен современным на то время испытательным и исследовательским оборудованием. Площадь филиала составляла 1,4 га.



Первая постройка
Батумской научно-исследовательской
станции (1943)



Атмосферная площадка
Батумской научно-исследовательской
станции (1948)



Климатическая площадка Батумского филиала ВИАМ (1976)

В состав Испытательного центра Батумского филиала входили: атмосферная и микологическая площадки, лаборатории металлографии, микологии, электрохимии, залы усталостных и ускоренных испытаний. Имелся уникальный стенд, созданный совместно с Московским машиностроительным заводом «Скорость» (ОАО «ОКБ имени А.С. Яковлева») для натурных испытаний отсека фюзеляжа с имитацией циклов «взлет–посадка».

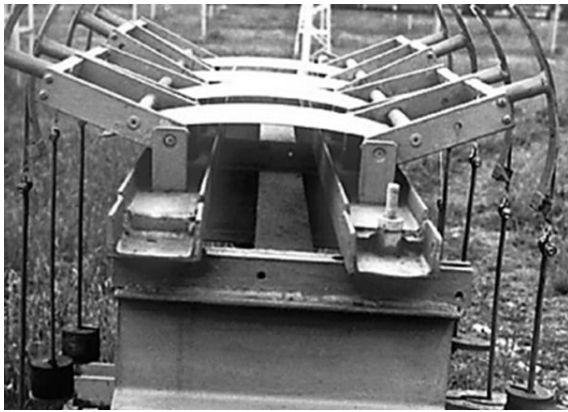
Работы Г.В. Акимова были продолжены его учениками и последователями и после его смерти в 1953 г.



Лаборатория металлографических
исследований



Лаборатория электрохимических
исследований



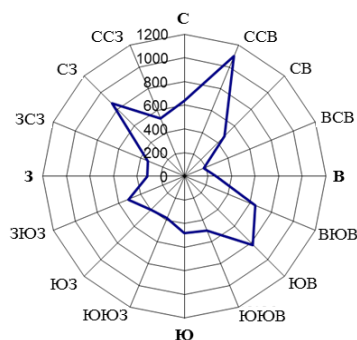
Испытания образцов под нагрузкой



Микробиологические испытания

После распада СССР в 1991 г. Батумский филиал ВИАМ оказался в другом государстве и часть образцов перевезли на экспозицию в Таганрогский авиационный научно-технический комплекс им. Г.М. Бериева и в г. Геленджик. В 1999 г. администрацией Краснодарского края было выделено 1,3 га земли и 70 м уреза воды. Началась стройка, и 30 августа 2004 г. введена в эксплуатацию первая очередь строительства Геленджикского центра климатических испытаний имени Г.В. Акимова (ГЦКИ ВИАМ): атмосферный испытательный полигон с метеостанцией, научно-инженерный корпус и вспомогательные сооружения (КПП, водопровод, скважина, тепло- и электроснабжение, канализация). 29 декабря 2009 г. ГЦКИ ВИАМ был полностью введен в эксплуатацию.

В настоящее время Геленджикский и Московский центры климатических испытаний имени Г.В. Акимова (МЦКИ ВИАМ) входят в международную сеть станций климатических испытаний Atlas Weathering Materials, оснащены современным исследовательским и испытательным оборудованием, позволяющим проводить натурные, натурно-ускоренные и ускоренные испытания.



Направление ветра в бухте г. Геленджика



Общий вид на испытательно-атмосферный полигон ГЦКИ ВИАМ

Геленджикский центр климатических испытаний имени Г.В. Акимова находится в приморской атмосфере умеренно теплого климата, по коррозионной агрессивности атмосферы – на одном уровне со станциями, расположенными в тропическом климате. Согласно международному стандарту ISO 9223 коррозионная агрессивность по стали, цинку и алюминию составляет С3, по меди С5. Доза солнечной радиации за год 4956 МДж/м², средние значения температуры и влажности в течение года 16 °С и 72 % соответственно. Температура воды в течение года находится в диапазоне от 4 до

28,4 °С с концентрацией солей от 16 до 20 %. Метеорологический комплекс ГЦКИ ВИАМ оснащен 16 датчиками для измерения параметров атмосферы и 30 датчиками определения температуры образцов, а гидрологический комплекс измеряет 15 параметров морской воды. Атмосферный испытательный полигон ГЦКИ ВИАМ оснащен 29 атмосферными стендами, находящимися под углом 45 градусов, для испытаний образцов материалов, 7 горизонтальными стендами для испытаний элементов конструкций, а также жалюзийным хранилищем, навесом и неотапливаемым складом для имитации хранения, что позволяет испытывать до 10000 образцов одновременно. Образцы экспонируются на натурной экспозиции в 20 м от моря, что способствует оседанию хлоридов и сульфатов, что значительно усиливает коррозионное воздействие [7–12].

Уникальная стендовая база ГЦКИ ВИАМ позволяет проводить испытания с наложением факторов эксплуатации:

- натурная экспозиция при приложении статической изгибающей нагрузки;
- натурная экспозиция с ежедневной имитацией цикла «взлет–посадка» (нагрев и охлаждение);
- климатические испытания крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с приложением динамических и статических нагрузок.



Стенды ГЦКИ ВИАМ для испытаний крупногабаритных конструкций на силовом полу, изготовленные по техническому заданию ФГУП «ВИАМ»

Во ФГУП «ВИАМ» спроектированы и изготовлены уникальные стенды для ГЦКИ и МЦКИ ВИАМ:

- для натурно-ускоренных испытаний полимерных материалов и защитных покрытий, стенд слежения за солнцем;
- для натурно-ускоренных испытаний металлических материалов и защитных покрытий, стенд автоматического орошения морской водой;
- для испытаний материалов, соединений и защитных покрытий в условиях морской среды;
- для испытаний материалов и защитных покрытий в потоке морской воды.

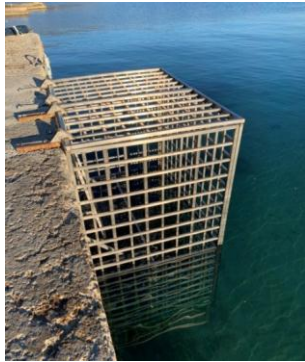
Геленджикский центр климатических испытаний имени Г.В. Акимова оснащен лабораторно-исследовательским комплексом испытательного оборудования, куда входит оборудование для физико-механических испытаний (8 ед.), теплофизических исследований (6 ед.), ускоренных климатических испытаний (15 ед.), а также исследовательское оборудование (24 ед.).



Стенд слежения за солнцем
в ГЦКИ ВИАМ



Стенд автоматического орошения морской водой
в ГЦКИ ВИАМ



Стенд для испытаний в условиях
морской среды в ГЦКИ ВИАМ



Стенд для испытаний в потоке морской воды
в ГЦКИ ВИАМ

Московский центр климатических испытаний имени Г.В. Акимова находится в промышленной атмосфере умеренного климата г. Москвы. Согласно международному стандарту ISO 9223 коррозионная агрессивность по стали, меди и алюминию составляет С2, по цинку С3. Доза солнечной радиации за год 4405 МДж/м², средние значения температуры и влажности в течение года 7,2 °С и 76 % соответственно. Метеорологический комплекс МЦКИ ВИАМ оснащен 26 датчиками для измерения параметров атмосферы, 10 датчиками определения температуры образцов и газоаналитическим комплексом, измеряющим концентрацию 6 агрессивных газов (озона, оксида и диоксида азота, аммиака, диоксида серы и сероводорода) в атмосфере. Атмосферный испытательный полигон МЦКИ ВИАМ оснащен 27 атмосферными стендами, находящимися под углом 45 градусов, для испытаний образцов материалов, 6 горизонтальными стендами для испытаний элементов конструкций, стендом слежения за солнцем и стендом «под стеклом» для испытаний материалов интерьера, а также жалюзийным хранилищем и навесом, что позволяет испытывать до 2000 образцов одновременно.

Уникальный комплекс испытательного оборудования, состоящий более чем из 100 ед., позволяет проводить испытания на воздействие внешних факторов: повышенной и пониженной температуры (а также ее перепадов температуры), повышенной и пониженной влажности, пониженного давления, солнечного излучения, дождя, песка (пыли), агрессивных сред, озона, солевого (морского) тумана, инея и росы.

Применяемые во ФГУП «ВИАМ» методики натуральных и ускоренных испытаний позволяют определять срок службы изделий и сохраняемость свойств материалов в заданных условиях, а также исследовать прочностные характеристики, структуру, теплофизические свойства, морфологию поверхности и др. после воздействия климатических факторов.



Атмосферный полигон МЦКИ ВИАМ



Зал ускоренных климатических испытаний

С учетом важности проведения натурных испытаний как единственного точного метода оценки климатической стойкости необходимо исследовать образцы материалов и изделий в условиях самых агрессивных типов климата. С этой целью в 2018 г. создана Российско-Кубинская станция для проведения климатических и микробиологических испытаний в условиях одной из наиболее агрессивных атмосфер влажного тропического климата Кубы (г. Санфюегос), которая по коррозионной агрессивности, согласно международному стандарту ISO 9223, для цинка и стали имеет высший балл Сх, а для меди и алюминия С5 и С4 соответственно [12–15].



Климатическая (слева) и микробиологическая (справа) площадки Российско-Кубинской станции климатических испытаний

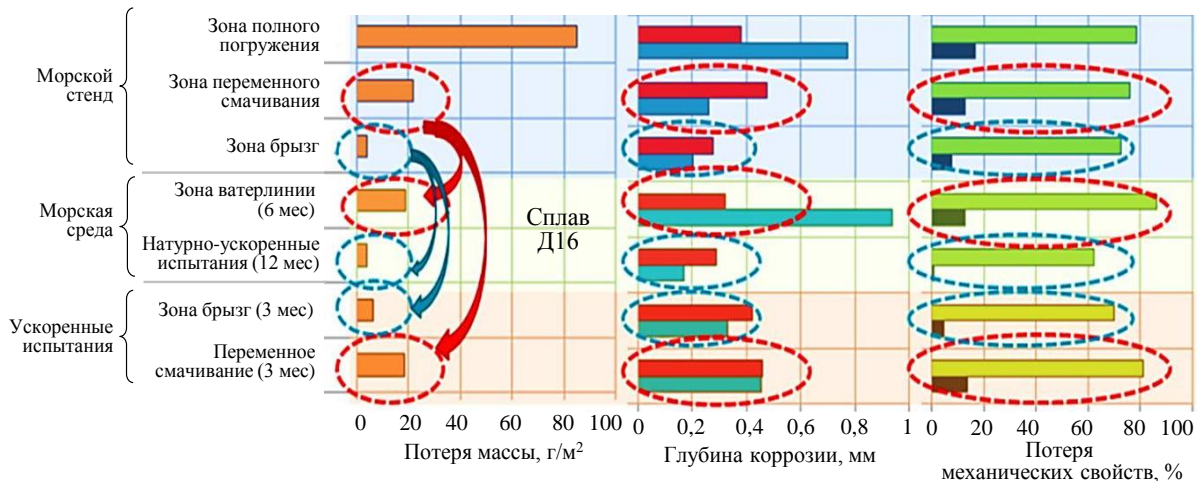
Планируются дальнейшее развитие Российско-Кубинской станции, создание береговой климатической площадки и установка морского подводного стенда для оценки защитных свойств покрытий в наиболее жестких условиях: при постоянном орошении аэрозолем морской воды, воздействии высокой дозы солнечной радиации (7100 МДж/м^2), влажности и температуре воздуха со среднегодовыми значениями: 81 % и $26,1 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно. Кроме того, морской стенд позволит изучать не только защитные свойства покрытий, но и их способность противостоять биообрастанию, что особенно важно для изделий, эксплуатируемых в морской среде. Температура воды в течение года находится в диапазоне от $25,3$ до $32,9 \text{ }^\circ\text{C}$ с концентрацией солей от 31,3 до 35,3 %.

Проводятся также натурные климатические испытания в условиях влажного тропического климата на приморской климатической станции Юго-Западного исследовательского института техники и технологии (SRITE, о. Хайнань, Китай). Согласно международному стандарту ISO 9223, коррозионная агрессивность по стали, цинку

и алюминию составляет С3, по меди С4 [16]. Доза солнечной радиации за год 4956 МДж/м², среднегодовые значения температуры и влажности составляют 16 °С и 72 % соответственно.

В 2021 г. планируется создание климатических испытательных площадок и проведение исследований климатической стойкости материалов и защитных покрытий в условиях высокогорно сухого тропического климата Ирана (г. Йезд) и Узбекистана (г. Термез), характеризующегося большими дозами солнечной радиации 6750 МДж/м², среднегодовой влажностью и температурой: 32 % и 19,3 °С соответственно. Особенностью данного климата является эрозионная составляющая; число дней с пылевыми бурями на территории Ирана – от 29,1 до 88,7; скорость ветра достигает 10–12 м/с; продолжительность бурь ~4 сут [17]. Данные климатические площадки позволят проводить исследования защитных покрытий на стойкость к эрозии в натуральных условиях.

Единственным недостатком натуральных испытаний является их значительная продолжительность, а оценку стойкости новых материалов к воздействию климатических факторов важно получить за относительно короткое время, в связи с чем необходимы математические модели прогнозирования изменения свойств материалов и наличие обоснования для сопоставления результатов ускоренных и натуральных испытаний. Кроме того, следует отметить, что требуется максимально приблизить механизмы старения или коррозии, протекающие в материале при натуральных и ускоренных испытаниях. В работе, проведенной в ГЦКИ ВИАМ на образцах из алюминиевого сплава Д16, была достигнута сходимость механизмов коррозии в морской среде и при ускоренных испытаниях. В рамках этой работы проведена оценка степени коррозионных повреждений и изменений механических характеристик образцов из сплава Д16 толщиной 2 мм после 6 и 12 мес экспозиции в морской среде, а также после 3 и 6 мес ускоренных коррозионных испытаний.

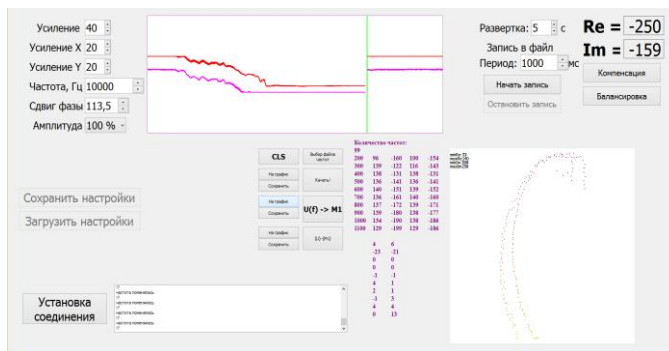


Сопоставление результатов натуральных и ускоренных испытаний по оценке степени коррозионных повреждений и изменений механических характеристик образцов из сплава Д16

Установлено, что механизмы коррозии при натуральных и ускоренных испытаниях близки друг к другу, что позволило получить коэффициенты ускорения для сплава Д16 в условиях морской среды. На основе данных коэффициентов можно спрогнозировать поведение материала по результатам ускоренных испытаний, но в дальнейшем данные результаты следует подтверждать в натуральных условиях [18–21].

При проведении ускоренных или натуральных испытаний на начальных стадиях, а также при эксплуатации изделий затруднительно или невозможно обнаружить коррозионные поражения при визуальном осмотре, особенно если нанесено лакокрасочное покрытие. Для решения данной задачи проведено исследование на образцах из алюминиевых сплавов с коррозионными повреждениями различного типа и разработан эффективный метод оценки степени коррозионных повреждений на основе двухчастотного вихретокового метода контроля, который позволяет проводить раздельный контроль типа и степени поражений.

Данный метод реализован с использованием программного обеспечения, разработанного во ФГУП «ВИАМ», на дефектоскопе с многочастотным способом анализа степени коррозионных поражений и записью данных во времени для определения кинетики развития поражений и позволяет обнаруживать коррозионные поражения на начальной стадии, в том числе при наличии лакокрасочного покрытия.



Интерфейс программного обеспечения



Дефектоскоп

Старение ПКМ, в отличие от коррозии металлических материалов, протекает как на поверхности, так и внутри материала. Процессы релаксации внутренних напряжений под действием температуры и сорбированной влаги, сила адгезионного взаимодействия армирующего наполнителя и полимерной матрицы, а также структурные изменения – все это влияет на конечные свойства ПКМ. При этом воздействие влаги может носить как обратимый, так и необратимый характер [8].

Переходя к конструкции, следует отметить, что оценить, какие изменения произошли в материале на уровне структуры, используя методы неразрушающего контроля, невозможно. Поэтому изменение свойств ПКМ в изделии и срок его службы необходимо начинать оценивать по следующей схеме: элементарный образец → соединение → конструктивно-подобный элемент → конструкция, следует учитывать нагрузки, которые будет испытывать конструкция в процессе эксплуатации, а также внешние факторы среды, такие как температура и ее цикличность, влага, воздействие рабочих жидкостей и т. д.

Ускоренные климатические испытания являются оценочными и служат для прогнозирования сохраняемости свойств в ожидаемых условиях эксплуатации. Однако требуется подтверждение прогноза и корректировка модели изменения свойств материала, полученных на основе результатов ускоренных испытаний, а для этого необходимо проведение длительных натуральных испытаний, последовательность проведения климатических испытаний представлена в таблице.

Для получения достоверного прогноза изменения свойств металлических и неметаллических материалов требуется проведение как натуральных, так и ускоренных испытаний.

Последовательность проведения климатических испытаний

Продолжительность испытаний		
0–1 год	2–5 лет	Более 5 лет
Ускоренные испытания		
Оценка сохраняемости свойств материала в ожидаемых условиях эксплуатации	Разработка модели прогнозирования изменений свойств материала в ожидаемых условиях эксплуатации	Уточненная модель для прогнозирования свойств материала на заданный срок службы в ожидаемых условиях эксплуатации
Натурные испытания		
Оценка способности материала работать в реальных (приближенных к ожидаемым) условиях эксплуатации	Корректировка/подтверждение модели в реальных (приближенных к ожидаемым) условиях эксплуатации	

В первый год при проведении ускоренных испытаний оцениваются свойства материалов в ожидаемых условиях эксплуатации, осуществляется наработка имитационных циклов воздействия эксплуатационных и климатических факторов. Параллельно в натуральных условиях происходит воздействие факторов окружающей среды с наложением эксплуатационных факторов (рабочие температуры и нагрузки).

В дальнейшем разрабатывается математическая модель прогнозирования изменений свойств материала в ожидаемых условиях эксплуатации и выполняется ее корректировка по результатам натурных испытаний.

После набора статистических данных по поведению материала в натуральных условиях получают уточненную модель изменения свойств материала в ожидаемых условиях эксплуатации, на основе которой можно строить длительные прогнозы и продлевать срок службы.

В настоящее время биологическое воздействие – один из главных факторов, влияющий на материалы и изделия и приводящий к снижению значений их характеристик. Как биоповреждения для неметаллических материалов, так и биологически инициируемая коррозия металлов требуют разработки новых методов защиты.

Воздействие микроорганизмов наиболее существенно в регионах с влажным тропическим климатом, где их активность значительно выше, чем в регионах с умеренным или холодным климатом. Во ФГУП «ВИАМ» с 1938 г. проводят испытания материалов на микробиологическую стойкость в воздушной и топливной средах, а также испытания биостойкости образцов топлива, масел и других нефтепродуктов как в лабораторных, так и в естественных условиях.

При использовании традиционных культуральных методов идентификации организмов-биодеструкторов можно распознать вид микроорганизма. Кроме того, большой вклад при этом вносит специалист, который его определяет. При этом штаммы одного вида микроорганизмов могут отличаться друг от друга своей способностью воздействовать на материал. Секвенирование ДНК позволяет определить видовую принадлежность микроорганизмов с достоверностью 98 % с последующей оценкой их активности по отношению к разным видам материалов и устойчивости к фунгицидам.

В 2021 г. создан участок идентификации микроорганизмов молекулярно-биологическими методами, который позволяет осуществлять исследования видового состава микроорганизмов, оседающих на поверхность материалов и изделий при натуральных испытаниях или при эксплуатации в различных климатических зонах, выполнять точный таксономический анализ биологического заражения горюче-

смазочных материалов, выявлять споры микроорганизмов-биодеструкторов и производить дифференциацию различных штаммов. На основании данных, полученных при выявлении биодеструкторов, которые поражают тот или иной материал, можно создавать средства защиты от биологического поражения для различных классов материалов. В настоящее время коллекция ФГУП «ВИАМ» насчитывает 163 штамма микроорганизмов, что может быть положено в основу тестирования эффективности создаваемых средств защиты.



Участок идентификации микроорганизмов молекулярно-биологическими методами

Метод ДНК-секвенирования помогает решать и обратную задачу – поиск биодеструкторов, которые могут разлагать полимерные отходы экологически чистым образом. Примером такой работы служат результаты, полученные в рамках исследования, выполненного при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-05033) [22, 23]. В промышленной оборотной воде нефтехимического предприятия были обнаружены *Ideonella sakaiensis* – граммотрицательные аэробные неспорообразующие бактерии палочковидной формы, разлагающие полиэтилентерефталат (ПЭТФ) на моногидроксиэтиловый эфир терефталевой кислоты, а в дальнейшем – на терефталевую кислоту и этиленгликоль.

Заключения

Благодаря инициативе и активному созданию Г.В. Акимовым, его учениками и последователями инфраструктуры климатических испытаний материалов и изделий в настоящее время открыты новые перспективные направления развития климатических и микробиологических испытаний:

- исследование сохраняемости свойств материалов в составе сложных технических систем при воздействии климатических факторов, плесневых грибов, бактерий и эксплуатационных нагрузок;
- разработка единого нормативного базиса натуральных и ускоренных климатических испытаний, математических моделей и методик прогнозирования сохраняемости свойств материалов в составе сложных технических систем;
- разработка систем защиты от коррозии, старения и биоповреждений сложных технических систем, эксплуатируемых в различных климатических зонах;
- создание и наполнение базы данных штаммов плесневых грибов и бактерий, идентифицированных методами молекулярной биологии, из районов эксплуатации сложных технических систем;

– формирование технического облика инфраструктуры и разработка методического обеспечения национальной сети центров климатических испытаний материалов и элементов конструкций сложных технических систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта 20-53-56009.

Библиографический список

1. Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945. 414 с.
2. Исследование коррозии металлов под напряжением / под ред. Г.В. Акимова. М.: Машгиз, 1953. 140 с.
3. Акимов Г.В., Розенфельд И.Л. Влияние концентрации водородных ионов на коррозию и электродный потенциал металлов // Исследования в области электрохимического и коррозионного поведения металлов и сплавов. М.: Оборонгиз, 1950. С. 201–233.
4. Палеолог Е.Н., Акимов Г.В., Томашов Н.Д., Короткова К.С. Влияние защитных пленок на коррозию и электрохимическое поведение магния // Проблема коррозии и защита металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 237–254.
5. Кларк Г.Б., Акимов Г.В. Электродные потенциалы твердых растворов на основе магния // Исследования в области электрохимического и коррозионного поведения металлов и сплавов. М.: Оборонгиз, 1950. С. 121–137.
6. 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.
7. Каблов Е.Н., Ерасов В.С., Панин С.В., Курс М.Г., Гладких А.В., Автаев В.В., Сорокина Н.И., Лукьянычев Д.А. Исследование совместного влияния механических нагрузок и климатических факторов на свойства материалов в составе крупногабаритной конструкции экспериментального отсека крыла после 4 лет испытаний // Доклады II Междунар. науч.-техн. конф. «Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате». М.: ВИАМ, 2016. Ст. 6.
8. 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.
9. 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: 15.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-84-91.
10. Красноярский В.В., Френкель Г.В., Носов Р.П. Коррозия и защита металлов. М.: Metallurgia, 1969. С. 9.
11. Поляков К.А., Сломянская Ф.Б., Полякова К.К. Коррозия и химически стойкие материалы. М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит-ры, 1953. С. 10.
12. Каблов Е.Н., Петрова А.П., Нарский А.Р. Г.В. Акимов – создатель отечественной науки о коррозии // История науки и техники. 2009. № 11. С. 12–15.
13. Castañeda A., Corvo F., Fernández D., Valdés C. Outdoor-Indoor Atmospheric Corrosion in a Coastal Wind Farm Located in a Tropical Island // Engineering journal. 2016. Vol. 21. Is. 2. P. 44–62.
14. Morcillo M., Chico B., de la Fuente D., Simancas J. Looking back on contributions in the field atmospheric corrosion offered by the MICAT Ibero-American testing network // International journal of corrosion. 2012. Vol. 2012. Art. ID 824365.
15. Dong J., Han E., Ke W. Introduction to atmospheric corrosion research in China // Science and Technology of Advanced Materials. 2007. No. 8. P. 559–565.
16. Переведенцев Ю.П., Занди Р., Аухадаев Т.Р. Динамика пыльных бурь на территории Хузестана (юго-запад Ирана) в начале XXI столетия // Российский журнал прикладной экологии. 2015. № 1. С. 10–14.

17. Христофоров Д.А., Ключниченко А.Б., Старцев В.О., Суранов А.Я., Физулов Б.Г., Старцев О.В. Линейная дилатометрия полимеров и полимерных композиционных материалов // Экспериментальные методы в физике структурно-неоднородных конденсированных сред: труды Второй Междунар. науч.-техн. конф. ЭФМ-2001. Барнаул: Алтайск. гос. ун-т, 2001. С. 186–194.
18. Низина Т.А., Старцев В.О., Селяев В.П., Старцев О.В., Низин Д.Р. Анализ влияния актинометрических параметров на интенсивность изменения цветовых характеристик эпоксидных композитов в условиях морского климата // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 5. С. 95–101.
19. Курс М.Г., Кутырев А.Е., Фомина М.А. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при лабораторных и натуральных испытаниях // Труды ВИАМ. 2016. № 8 (44). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-10-10.
20. Абрамова М.Г. К вопросу о подтверждении идентичности механизма коррозионного разрушения алюминиевых сплавов (обзор). Часть 1. Атмосферная коррозия // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-86-94.
21. Абрамова М.Г. К вопросу о подтверждении идентичности механизма коррозионного разрушения алюминиевых сплавов (обзор). Часть 2. Коррозия в морской воде // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 09. URL: <https://journal.viam.ru> (дата обращения: 07.07.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-95-103.
22. 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. Vol. 12. Art. 3624. DOI: 10.3390/su12093624.
23. Yang Y., Yang J., Wu W.-M. et al. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: part 2. Role of gut microorganisms // Environmental Science & Technology. 2015. Vol. 49. P. 12087–12093. DOI: 10.1021/acs.est.5b02663.