

УДК 620.193.21

Е.Ю. Ветрова¹, В.К. Щекин¹, М.Г. Курс¹

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ АГРЕССИВНОСТИ АТМОСФЕРЫ

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81

Представлены методы мониторинга и анализа двух аэрохимических параметров атмосферы – скорости осаждения из атмосферы хлорид-ионов и диоксида серы, а также результаты их измерений в течение года на восьми климатических станциях. При определении скорости осаждения атмосферного диоксида серы опробован метод «сульфатной чаши», по функциям «доза–ответ» рассчитаны годовые массопотери стандартных металлов для данного метода, получены сопоставимые значения с методом «сульфатной пластины» при определении категорий коррозионной агрессивности. Проведен анализ проб на содержание сульфата турбидиметрическим методом.

Ключевые слова: аэрохимические параметры, методы «влажной свечи» и «сухого полотна», сульфатная пластина/чашка/цилиндр, турбидиметрический анализ.

E.Yu. Vetrova¹, V.K. Shchekin¹, M.G. Kurs¹

COMPARATIVE EVALUATION OF METHODS FOR THE DETERMINATION OF CORROSION AGGRESSIVITY OF THE ATMOSPHERE

The paper presents methods for monitoring and analyzing two aerochemical parameters of the atmosphere – the deposition rate from the atmosphere of chloride ions and sulfur dioxide – and the results of measurements during the year at eight climate stations. During determining the deposition of atmospheric sulfur dioxide, the «sulphate cup» method was tested, the dose-response functions were used to calculate the annual mass loss of standard metals for this method, and comparable values were obtained with the «sulphate plate» method in determining the categories of corrosivity. The analysis of the samples on the sulfate content by turbidimetric method was carried out.

Keywords: aerochemical parameters, methods «wet candle» and «dry cloth», sulphate plate/cup/cylinder, turbidimetric analysis.

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

Проведение климатических испытаний материалов в целях определения стойкости к воздействию коррозии и старению для обоснования возможности и целесообразности использования их в изделиях перспективной техники, установления обоснованных сроков службы с учетом климатических районов эксплуатации изделий является одним из основных направлений развития климатических испытаний [1]. На этапе создания новых материалов нужно спрогнозировать, как они поведут себя в условиях эксплуатации. При этом необходимо защитить материалы от воздействия окружающей среды. Согласно опыту некоторых стран, можно избежать приблизительно четверти всех потерь, если использовать научно обоснованные методы защиты материалов от коррозии, старения, биоповреждений и других климатических факторов. Таким образом, важной задачей климатических испытаний является совершен-

ствование методов оценки коррозионной агрессивности среды [2–3]. Увеличение концентрации химических соединений в природной среде приводит к значительной интенсификации коррозионных процессов [4–6], повышая агрессивность среды по отношению к материалам. Насыщение воздуха коррозионно-активными компонентами является ключевой характеристикой коррозионной агрессивности атмосферы. Параметры воздуха для оценки коррозионной агрессивности атмосферы по ISO 9223 [7] и ГОСТ 9.039–74 [8] устанавливаются по концентрации в воздухе и скорости оседания на поверхности диоксида серы и хлоридов. Методы определения данных параметров регламентированы ГОСТ 9.039–74 «Коррозионная агрессивность атмосферы» и ISO 9225 «Измерение окружающих параметров, влияющих на коррозионность атмосфер» [9]. В данных документах для оценки коррозионности атмосферы обязательным является определение загрязнения

диоксидом серы и хлоридами. Другие виды загрязнений рассматриваются как сопутствующие.

Приведенные в ГОСТ 9.039–74 и в ISO 9225 методики сбора и анализа хлорид-ионов и диоксида серы идентичны. Ключевым отличием данных стандартов является регламентация ISO 9225 способов сбора диоксида серы методами «сульфатных чашек» и «сульфатных цилиндров», отсутствующих в ГОСТ 9.039–74, при этом методика анализа данных пробоотборников в ISO 9225 нестандартизована.

Цель данной работы – мониторинг скорости осаждения из атмосферы хлорид-ионов и диоксида серы с применением различных способов пробоотбора, разработка методики анализа проб, отобранных методами «сульфатной чашки» и «сульфатного цилиндра», а также проведение сравнительной оценки методов, используемых для оценки коррозионной агрессивности атмосферы.

В данной работе проведен мониторинг коррозионной агрессивности атмосферы следующих климатических станций.

1. Геленджикский центр климатических испытаний (ГЦКИ) – морская атмосфера умеренно теплого климата с мягкой зимой.

2. Московский центр климатических испытаний (МЦКИ) – промышленная атмосфера умеренного климата.

3. Кавказский государственный природный биосферный заповедник им. Х.Г. Шапошникова, г. Сочи (КГПБЗ) – условно чистая атмосфера субтропического влажного климата.

4. Морская коррозионная станция института химии ДВО РАН, о. Русский, бухта Рында (ИХ ДВО) – морская атмосфера умеренно влажного муссонного климата.

5. Якутская станция института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения РАН, г. Якутск (ИФТПС) – промышленная атмосфера очень холодного климата.

6. Звенигородская коррозионная станция института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Звенигород (ЗКС) – условно чистая атмосфера умеренного климата.

7. Северная коррозионная станция института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, пос. Дальние Зеленцы Мурманской области (СКС) – морская атмосфера умеренно холодного климата.

8. Дальневосточная коррозионная станция института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, пригород г. Владивостока (ДВКС) – морская атмосфера умеренно влажного климата.

На всех вышеперечисленных станциях в течение одного года с мая 2017 г. посезонно определяли количество примесей в атмосфере при экспозиции «влажных свечей», «сульфатных чашек» и «сульфатных пластин».

Материалы и методы

При определении уровня загрязнения атмосферы коррозионно-активными примесями возможно измерение как скорости их осаждения, так и объемного показателя, выраженного в мг/м³. В данной работе проводилась оценка скорости осаждения, так как именно этот показатель характеризует количество коррозионно-активных компонентов, осаждающихся непосредственно на исследуемом материале, что наиболее важно для установления степени воздействия хлорид-ионов и диоксида серы на коррозионное разрушение материалов.

Определение параметров загрязненности атмосферы проводили по следующей схеме.

1. Отбор проб:

- приготовление пробоотборника;
- экспозиция пробоотборника.

2. Приготовление раствора для проведения анализа.

3. Анализ раствора:

- количество хлоридов – титриметрическим методом;
- количество диоксида серы – гравиметрическим и турбидиметрическим методами.

Определение скорости осаждения хлоридов

Ионы хлора относятся к климатическим факторам, оказывающим наибольшее влияние на коррозионное разрушение материалов. В приморских регионах хлорид-ионы, выносимые ветрами с поверхности моря, осаждаются на увлажненную поверхность металла, формируют пленку электролита и стимулируют развитие электрохимического процесса атмосферной коррозии [10]. В работе [11] показано, что при проведении натурно-ускоренных испытаний с распылением раствора морской соли увеличение степени удержания хлоридов на поверхности образцов алюминиевых сплавов является следствием увеличения площади коррозионных поражений, что, в свою очередь, приводит к увеличению скорости коррозии материалов.

Скорость выпадения хлоридов зависит от ветрового режима – скорости, направления, продолжительности воздействия ветра определенной скорости и направления, рельефа местности, удаленности от береговой линии. С увеличением скорости морского ветра интенсивность выноса аэрозолей, содержащих хлориды, резко возрастает. При небольших скоростях ветра (до 4–5 м/с) зависимость количества оседающих хлоридов от скорости ветра практически линейная, но при превышении значения в 5–6 м/с становится уже степенной. На разном удалении от уреза воды количество хлорид-ионов в атмосфере существенно отличается (например, на расстоянии 50 и 2000 м разница – более чем в 10 раз) и после отметки в 2000 м сопоставимо с фоновыми значениями. При прочих равных условиях при увеличении расстоя-

ния от моря или другого источника хлоридов снижается скорость коррозии, а также глубина коррозионных поражений [12–14].

При определении количества выпадения хлоридов отбор проб проводят методом «сухого полотна» и (или) «влажной свечи». Сущность методов состоит в экспонировании сухой/влажной тканевой поверхности, на которую осаждаются из атмосферы ионы хлора. Данные способы отбора проб регламентированы ГОСТ 9.039–74, а также ISO 9225.

Экспонирование образцов методами «сухого полотна/влажной свечи» проводят на стенде под центральной частью навеса (рис. 1), причем стенд установлен таким образом, чтобы к нему был обеспечен свободный доступ воздуха со всех сторон, исключено прямое влияние атмосферных осадков и он не заслонен от моря как основного источника хлоридов. При методе «влажной свечи» пробоотборники равнодоступны ветрам всех направлений, в то время как действие метода «сухого полотна» избирательно и зависит от расположения рабочей поверхности пробоотборника. Недостатком процесса отбора проб по методу «сухого полотна» является механическая потеря частиц соли в процессе экспозиции во время сильных ветров. При методе «влажной свечи» влажная ткань удерживает солевые частицы и подобных потерь не происходит. Поэтому среднегодовая скорость осаждения хлоридов по методу «влажной свечи» в среднем в 2 раза выше, чем по методу «сухого полотна» [14]. При испытании этими методами ежемесячно экспонируют параллельно по три образца каждого вида. Количество осажденных хлоридов определяют титриметрическим методом.

Скорость осаждения хлоридов S , выраженную в $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, определяют по формуле

$$S = \frac{m_1 - m_0}{At},$$

где m_1 – общая масса хлорид-ионов в растворе пробы, мг; m_0 – общая масса хлорид-ионов в растворе, приготовленном из неэкспонированного пробоотборника тех же размеров (контрольного образца), мг; A – площадь экспонированной поверхности, м^2 ; t – продолжительность экспозиции, сут.

Методика определения скорости осаждения хлоридов методом «влажной свечи» аналогична методикам, представленным в ГОСТ 9.039–74, ISO 9225 и ASTM G140 [15].

Метод «влажной свечи» используют для определения скорости осаждения хлорид-ионов для установления классификации типов атмосфер в соответствии с международным стандартом ISO 9223.

Определение скорости осаждения диоксида серы

Отбор проб для определения количества диоксида серы (SO_2) в атмосфере – согласно ГОСТ 9.039–74 и ISO 9225 – проводят методом «сульфатных пластин». В ISO 9225 также предложены методы «сульфатных чашек» и «сульфатных цилиндров», которые опробованы в данной работе.

Уровень атмосферного диоксида серы варьируется сезонно в течение года, так что требуется проводить как минимум четыре 30-дневные экспозиции в год с приблизительно равными интервалами. После экспозиции содержимое сульфатной пластины/чашки/цилиндра растворяют, осаждают и определяют количество осажденных сульфатов с применением гравиметрического (химического) анализа. В ASTM G91-2011 [16] предложен также и турбидиметрический (физико-химический) метод.



Рис. 1. Экспозиция пробоотборников под навесом ГЦКИ для определения количества хлоридов и диоксида серы в атмосфере



Рис. 2. Сульфатные чашки для определения количества диоксида серы в атмосфере

В Геленджикском центре климатических испытаний (ГЦКИ) накоплены многолетние данные по определению количества выпадения диоксида серы методом «сульфатных пластин» гравиметрическим способом. Результаты распределены по сезонам таким образом: весной и осенью скорость осаждения составляет 3,0–3,2 мг/(м²·сут), зимой 5,9–6,1 мг/(м²·сут), а в летний период 1,9 мг/(м²·сут). Приведем далее краткие сведения о методах «сульфатной чашки» и «сульфатного цилиндра», описания которых отсутствуют в отечественной нормативной базе, также не имеется и публикаций на данную тему.

Методы «сульфатной чашки» и «сульфатного цилиндра» регламентированы ASTM G91 и ISO 9225. Сущность методов состоит в том, что атмосферный диоксид серы вступает в реакцию с диоксидом свинца с образованием сульфата свинца. По завершении экспозиции выполняют анализ содержимого пробоотборников для определения количества осажденного диоксида серы. Метод «сульфатной чашки» обеспечивает простой способ определения уровня SO₂ в атмосфере с получением взвешенного среднего результата. Метод

«сульфатного цилиндра» подобен методу «сульфатной чашки», дает сопоставимые результаты с этим методом, однако более чувствителен к низким уровням SO₂.

Сульфатная чашка – это чашка Петри с реактивом на основе диоксида свинца (рис. 2). Чашка устанавливается под навесом горизонтально в перевернутом положении таким образом, что реактив на основе диоксида свинца обращен вниз и не защищен от воздушных потоков и воздействия ветра (рис. 3). При определении количества диоксида серы на атмосферных испытательных площадках параллельно экспонируют минимум три чашки для каждого периода отбора проб.

Сульфатный цилиндр – это цилиндр из инертного материала, используемый в качестве формы для удержания ткани, пропитанной смесью на основе диоксида свинца (рис. 4). Цилиндр устанавливают в вертикальном положении под навесом в хорошо вентилируемом месте. При определении количества диоксида серы на атмосферных испытательных площадках параллельно экспонируют минимум два цилиндра



Сульфатная чашка

Рис. 3. Экспозиция сульфатной чашки для определения количества диоксида серы в атмосфере



Рис. 4. Сульфатный цилиндр для определения количества диоксида серы в атмосфере

для каждого периода отбора проб. Количество осажденного диоксида серы определяют гравиметрическим методом и по формуле, приведенной ранее, рассчитывают скорость осаждения диоксида серы; результаты выражают в $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Турбидиметрический метод анализа

Анализ подготовленных проб на содержание сульфата проводили гравиметрическим методом по ГОСТ 9.039–74 и турбидиметрическим методом, рекомендованным в ASTM G91-2011 и ISO 9225:2012.

Сущность гравиметрического метода заключается в осаждении сульфата в подготовленной пробе хлоридом бария. Далее определяют массу выпавшего осадка сульфата бария.

Турбидиметрический метод основан на измерении интенсивности света, рассеянного взвешенными частицами исследуемого раствора подготовленной пробы.

Для отработки турбидиметрического метода по определению количества диоксида серы в атмосфере в качестве пробоотборников использовали сульфатные чашки по ISO 9225. Сульфатные чашки находились на экспозиции в натуральных условиях ГЦКИ под навесом в течение 1 мес. Для определения диоксида серы турбидиметрическим методом использовали спектрофотометр СПЕКС ССП-310.

Работу по определению количества сульфат-ионов проводили по следующей методике:

- 1 – пробоподготовка сульфатной чашки для проведения анализа (перевод осажденного диоксида серы в раствор сульфат-ионов);
- 2 – приготовление раствора осаждения;
- 3 – приготовление градуировочных растворов;
- 4 – проведение анализа.

1. Пробоподготовку сульфатной чашки для

определения количества диоксида серы проводили растворением осадка сульфата свинца с помощью водного раствора карбоната натрия. Далее смесь фильтровали под вакуумом, осадок на фильтре промывали не менее 3 раз дистиллированной водой.

2. При проведении анализа отработаны процессы приготовления раствора осаждения из хлорида бария, борной кислоты, глицерина и соляной кислоты.

Первично использовали раствор осаждения, приготовленный с соляной кислотой. Однако данный раствор осаждения при измерениях оптической плотности градуировочных растворов не позволил выявить зависимость от величины концентрации сульфат-иона в растворе. Поэтому раствор осаждения готовили с использованием борной кислоты. Данный раствор позволяет стабилизировать взвесь сульфата бария во всем объеме пробы и градуировочных растворах. При измерении оптической плотности градуировочных растворов с добавлением борной кислоты четко прослеживается зависимость от концентрации сульфат-ионов.

3. Для приготовления градуировочных растворов использовали ГСО 7253–96 сульфат-иона с массовой концентрацией $1 \text{ мг}/\text{см}^3$ по ГОСТ 4166–76 [17]. Результаты оптической плотности пробы и градуировочных растворов при стабилизации взвеси сульфата бария оказались удовлетворительными (рис. 5). Прослеживается четкая взаимосвязь абсорбционности от величины концентрации сульфат-ионов с высоким коэффициентом корреляции $r=0,999957$.

4. Измерение оптической плотности проводили с помощью спектрофотометра на длине волны 650 нм в кювете с поглощающим слоем толщиной 30 мм. Оптическую плотность раствора пробы

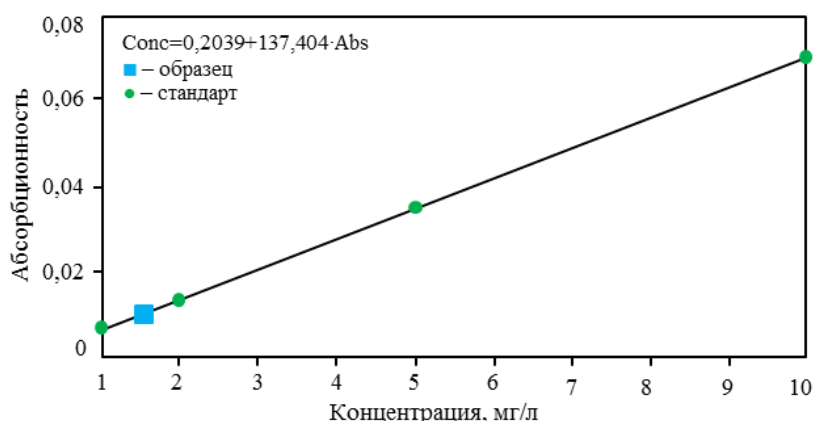


Рис. 5. Градуировочный график для определения концентрации сульфат-иона в растворе (синим цветом помечен результат измерения концентрации сульфат-иона в исследуемом растворе)

определяли через то же количество времени, что и градуировочные растворы (5–10 мин после приготовления). Результаты измерения градуировочных растворов и исследуемого образца представлены на рис. 5.

Таким образом, турбидиметрический метод позволяет точно определить количество сульфат-ионов после проведенной пробоподготовки. При пересчете можно определить количество диоксида серы, осадившего на сульфатной чашке.

Результаты и обсуждение

В мае 2017 г. на восьми климатических станциях РФ были установлены на экспозицию образцы (влажные свечи, сульфатные чашки и сульфатные пластины) для годового мониторинга скорости осаждения из атмосферы хлорид-ионов и диоксида серы.

Высокие уровни скорости осаждения хлоридов, соответствующие категориям C_3 – C_4 по ГОСТ 9.039–74, получены на приморских станциях в Геленджике, Дальних Зеленцах и во Владивостоке на Дальневосточной коррозионной станции. Пониженные значения (категория C_2) – зафиксированы на континентальных станциях в Якутске, Москве и Звенигороде. В условно чистой атмосфере климатической площадки биосферного заповедника, расположенной в горах на высоте 570 м над уровнем моря, самое низкое значение скорости осаждения хлоридов: 1,1 мг/(м²·сут).

В целом уровень скорости осаждения диоксида серы на всех станциях не превышает естественный фоновый, однако по сравнению с сельской атмосферой Звенигородской коррозионной станции, которая находится в лесопарковой зоне Подмосковья, на испытательной площадке во Владивостоке значение больше в 4 раза, а на Северной коррозионной станции в Дальних Зеленцах – в 6 раз. Наименьшие значения SO_2 зафиксированы в Сочи.

Для полученных значений уровня диоксида серы с использованием пробоотборников в виде сульфатных пластин и сульфатных чашек проведен расчет потери массы стандартных металлов с помощью функций «доза–ответ» (далее – ФДО) по ISO 9223. Результаты представлены на рис. 6 в сравнении с результатами прямых измерений скорости коррозии образцов стандартных материалов.

Полученный разброс значений на категорию коррозионной агрессивности атмосферы влияния не оказывает ввиду достаточно больших диапазонов граничных значений. Таким образом, для определения коррозивности возможно применение обоих методов оценки количества диоксида серы в атмосфере – и «сульфатной чашки», и «сульфатной пластины». Но при проведении работы по пробоотбору и анализу результатов установлено, что наиболее целесообразно применение метода «сульфатной пластины», обладающего рядом преимуществ по сравнению с методом «сульфатной чашки» – это меньшая трудоемкость подготовки пробоотборников, анализа количества адсорбированного диоксида серы, а также лучшая сходимость получаемых значений.

Заключения

1. Впервые в различных климатических зонах РФ проведен мониторинг содержания диоксида серы в атмосфере по методу «сульфатной чашки». Получены сопоставимые значения с методом «сульфатной пластины» при определении категории коррозионной агрессивности.

2. Показано, что в сравнении с методами «сульфатной чашки» и «сульфатного цилиндра» метод «сульфатной пластины» наиболее целесообразен для применения ввиду простоты изготовления пробоотборников, меньшего количества необходимых расходных материалов, меньшей трудоемкости подготовки пробоотборников, а также лучшей сходимости получаемых значений.

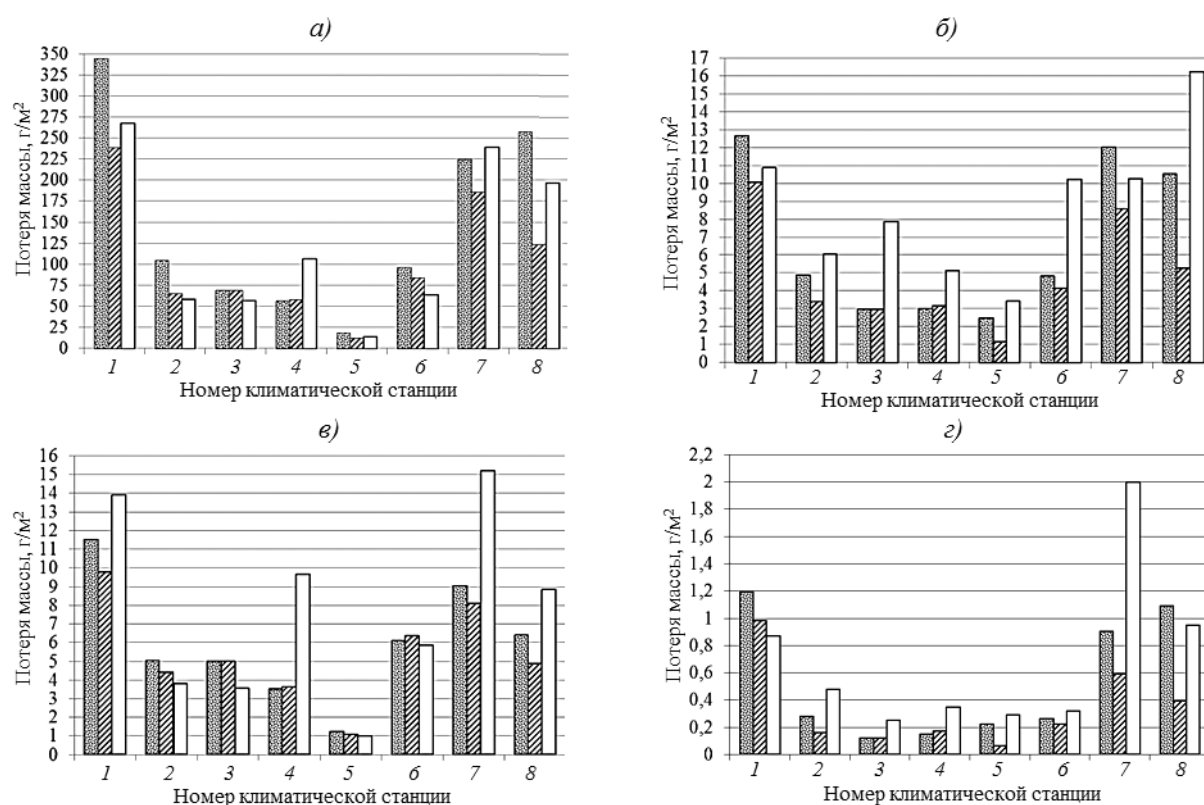


Рис. 6. Потери массы стандартных образцов из Ст.3 (а), Ц-0 (б), М1 (в), А5м (г), рассчитанные с помощью ФДО по результатам определения количества диоксида серы в атмосфере методами «сульфатной чашки» (▨) и «сульфатной пластины» (□), а также измеренные прямым способом (□) на климатических станциях – см. текст: 1 – ГЦКИ; 2 – МЦКИ; 3 – КГПБЗ; 4 – ИХ ДВО; 5 – ИФТПС; 6 – ЗКС; 7 – СКС; 8 – ДВКС

3. Опробован турбидиметрический метод анализа для определения сульфат-ионов в растворах проб. Показано, что данный метод обладает высокой сходимостью результатов, а также меньшей трудоемкостью проведения анализа по сравнению с гравиметрическим методом.

Статья подготовлена на основе доклада на конференции «Климат-2018: Вопросы прогнозирования коррозии, старения и биоповреждения материалов» (19–20 июля 2018 г., ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова).

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 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
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. Варченко Е.А., Курс М.Г. Щелевая коррозия алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей в морской воде // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №7 (67). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-96-105.
5. Курс М.Г., Кутырев А.Е., Фомина М.А. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при лабораторных и натурных испытаниях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №8 (44). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-10-10.
6. Варченко Е.А., Курс М.Г. Натурные испытания металлических материалов в морской воде: ключевые подходы к оценке стойкости к коррозии и биоповреждению // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017.

- №11 (59). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-12-12.
7. ISO 9223:2012. Коррозия металлов и сплавов – Коррозивность атмосфер – Классификация, определение и оценка. Швейцария, Женева: ISO, 2012. 15 с.
 8. ГОСТ 9.039–74. ЕСЗКС. Коррозионная агрессивность атмосферы. М.: Изд-во стандартов, 1974. 39 с.
 9. ISO 9225:2012. Коррозия металлов и сплавов – Коррозивность атмосфер – Измерение окружающих параметров, влияющих на коррозивность атмосфер. Швейцария, Женева: ISO, 2012. 22 с.
 10. Жирнов А.Д., Стрекалов П.В., Каримова С.А. и др. Сезонная динамика процесса коррозии металлов на береговой зоне Черного моря // Коррозия: материалы, защита. 2007. №8. С. 23–36.
 11. Курс М.Г., Антипов В.В., Луценко А.Н., Кутырев А.Е. Интегральный коэффициент коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3 (42). С. 24–32. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-24-32.
 12. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2013. №12. С. 6–18.
 13. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость листов сплава Д16ч.-Т в морских субтропиках // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №7. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-11-11.
 14. Михайлов А.А., Жирнов А.Д., Жиликов В.П., Каримова С.А. и др. Коррозивность приморских атмосфер // Сб. матер. VII науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2008». 2008. С. 299–306.
 15. ASTM G140-08. Стандартный метод для определения скорости осаждения из атмосферы хлоридов методом влажной свечи. США, ASTM, 2008. 4 с.
 16. ASTM G91-2011. Стандартная практика для мониторинга скорости осаждения из атмосферы SO₂ для оценки атмосферной коррозии. США, ASTM, 2011. 6 с.
 17. ГОСТ 4166–76. Реактивы. Натрий серноокислый. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2005. 9 с.