

УДК 620.1:669.715

Д.В. Чесноков<sup>1</sup>, В.В. Антипов<sup>1</sup>, Н.В. Кулюшина<sup>1</sup>**МЕТОД УСКОРЕННЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ЦЕЛЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ИХ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ  
В УСЛОВИЯХ МОРСКОЙ АТМОСФЕРЫ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-10-10

*Предложен метод ускоренных лабораторных испытаний алюминиевых сплавов В95-Т2 и 1424-ТГ1 с определением коррозионных потерь в зависимости от продолжительности увлажнения, температуры и поверхностной концентрации хлоридов. При разработке методики испытаний использовали математическое планирование эксперимента. На основании анализа экспериментальных данных получены математические модели, диаграммы зависимости коррозионных потерь от продолжительности увлажнения и седиментации хлоридов при фиксированных значениях температуры. Полученные результаты позволяют провести предварительную ориентировочную оценку коррозионной стойкости алюминиевых сплавов при эксплуатации в условиях морской атмосферы.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 18.3. «Моделирование и прогнозирование климатической стойкости» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** *алюминиевые сплавы, защита от коррозии, ускоренные коррозионные испытания, коррозионная стойкость, коррозионные потери, седиментация хлоридов, математическое планирование эксперимента.*

*The method of laboratory tests of aluminum alloys for determination of corrosion resistance depending on duration of moistening, temperature and deposition rate of chlorides is offered. When developing test method mathematical planning of experiment was used. As a result of research of mathematical models, dependences of corrosion losses on duration of moistening and sedimentation of chlorides are received at different values of temperature. The received results give preliminary rough estimate of corrosion resistance of aluminum alloys at operation in conditions of the sea atmosphere.*

*In article results of works on the complex scientific direction 18.3. «Modeling and forecasting of climatic resistance» are provided («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** *aluminum alloys, corrosion protection, accelerated corrosion tests, corrosion resistance, corrosion losses, chloride deposition, mathematical planning of experiment.*

---

<sup>1</sup>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

**Введение**

В настоящее время активно развиваются технологии получения multifunctional материалов, применяемых для изготовления военной и специальной техники нового поколения [1, 2]. Современные материалы обеспечивают более высокие прочностные свойства конструкциям и деталям приборов, аппаратов и машин, но, несмотря на хорошие физико-механические свойства, нуждаются в антикоррозионной защите. По-

этому увеличение стойкости конструкций из новых материалов к воздействию внешних факторов окружающей среды является важной научно-технической задачей [3, 4].

В настоящее время металлы по-прежнему остаются одними из основных конструкционных материалов, используемых в различных отраслях промышленности, в том числе в авиастроении [5, 6]. Известно, что металлические материалы, разрабатываемые для авиации, должны не только выдерживать высокие механические нагрузки, но и обеспечивать защиту от коррозии конструкций и деталей летательных аппаратов при эксплуатации во всеклиматических условиях [3]. Сведения о потере свойств материалов во времени дают возможность прогнозировать межремонтные сроки эксплуатации изделий, производить своевременную замену дефектных узлов и деталей, и тем самым сохранять надежность эксплуатации самолетов и вертолетов.

Для определения коррозионной стойкости металлических материалов проводят ускоренные лабораторные и натурные испытания на климатических станциях. Однако лабораторные испытания могут дать лишь ориентировочную оценку коррозионной стойкости и ресурса материала в сравнении с аналогами [7]. Натурные исследования проводят в условиях, близких к эксплуатационным, в течение довольно длительного времени. Связано это с тем, что на процесс коррозии оказывает влияние большое количество постоянно меняющихся факторов, учесть которые за сравнительно короткий срок практически невозможно. Вероятность прогноза повышается при использовании как можно большего количества климатических станций и увеличении продолжительности испытаний [4, 7]. Таким образом, при назначении новых материалов, видов полуфабрикатов, технологических режимов термообработки, в том числе сварки и пайки элементов конструкции летательных аппаратов, невозможно в короткие сроки предоставить прогнозную оценку их коррозионного поведения в условиях эксплуатации в связи с довольно сложным длительным комплексом коррозионных исследований.

Вопросы прогнозирования коррозионной стойкости изучаются как зарубежными, так и отечественными исследователями. Некоторые исследователи для прогнозирования атмосферной коррозии металлов предлагают использовать методы математической статистики при испытаниях в различных климатических районах [8]. Однако полученные в процессе работы математические модели могут быть использованы для определенного класса материалов и применимы только для той климатической зоны, в которой проводили испытания.

Согласно данным научно-технической литературы [9–12] разработаны физико-математические модели, в которых отражена причинная связь скорости коррозии металлов с метеорологическими и аэрохимическими параметрами атмосферы на основе фактических данных, полученных на климатических станциях стран – членах Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ). Полученные модели имеют довольно сложный вид с большим количеством расчетных коэффициентов. При этом расчетные значения коррозии могут значительно отличаться от наблюдаемых – до 40–70%.

Более простые математические модели представлены в работах [13, 14]. В первой из них эмпирические значения коэффициентов уравнения рассчитываются по значениям концентрации ионов  $Cl^-$  и  $SO_4^{2-}$ , полученных на основании химического анализа продуктов коррозии алюминиевого сплава. Сложный расчет коэффициентов уравнения усложняет применение математической модели. Во второй работе постоянные уравнений, входящие в математическую модель, определяются по большому массиву данных, а сама модель применима только для района г. Владивостока.

В работе [15] применен метод оценки коррозии в натуральных условиях при искусственной седиментации хлоридов – дополнительным периодическим нанесением на поверхность образцов раствора хлористого натрия различной концентрации, что позво-

ляет ускорить испытания. Однако прогнозная оценка коррозии (исходя из допущения в первом приближении) делается на основании линейной зависимости коррозионных потерь от продолжительности экспозиции, является ориентировочной и применима только к той климатической зоне, в которой проводятся испытания.

Таким образом, актуальна разработка ускоренного лабораторного метода прогнозирования коррозионной стойкости металлических материалов, коррелирующего с результатами натуральных исследований в различных климатических зонах и позволяющего на основании математической модели определить коррозионные потери материала в зависимости от параметров коррозионной среды.

### Материалы и методы

Испытания проводили на образцах из алюминиевых сплавов марок В95-Т2 и 1424-ТГ1 размером 150×100×2 мм. Перед исследованиями образцы обезжиривали органическим растворителем и взвешивали, затем выдерживали в течение 30 мин в растворе NaCl с концентрацией 10, 50 и 100 г/л для осаждения на металлической поверхности хлорид-ионов, после чего сушили на воздухе. Для каждой серии испытаний готовили контрольные образцы, с помощью которых определяли количество осевших на металлической поверхности хлоридов. Для этого с поверхности контрольных образцов смывали осажденные хлориды при кипячении в дистиллированной воде в течение 1 ч. Содержание хлоридов в воде после кипячения определяли фотоколориметрическим методом. Поверхностную концентрацию хлоридов на металлах рассчитывали по формуле:

$$C_{Cl} = \frac{C'_{Cl} \cdot V_n \cdot V_p}{S \cdot V_n}, \quad (1)$$

где  $C_{Cl}$  – поверхностная концентрация хлоридов, г/м<sup>2</sup>;  $C'_{Cl}$  – содержание хлорида в пробе, взятой для нефелометрирования, г/мл;  $V_n$  – объем раствора для нефелометрирования,  $V_n=25$  мл;  $V_p$  – объем рабочего раствора, мл;  $S$  – общая площадь образца, м<sup>2</sup>;  $V_n$  – объем пробы, взятой из рабочего раствора, мл.

Образцы из алюминиевых сплавов с осажденными на поверхности хлоридами выставляли в эксикаторы в вертикальном положении на колодках, изготовленных из оргстекла. На дно эксикаторов наливали дистиллированную воду для обеспечения непрерывного увлажнения поверхности образцов на протяжении всего срока испытаний. Эксикаторы, заполненные образцами, помещали в термостаты и выдерживали при температуре от 10 до 40°С в течение 150 сут с промежуточными съемами через каждые 30 сут. По окончании цикла испытаний образцы промывали в кипящей дистиллированной воде, затем выдерживали в 30%-ной азотной кислоте до полного снятия продуктов коррозии, промывали, высушивали, взвешивали на аналитических весах и определяли потерю массы.

Обработку результатов испытаний производили с помощью компьютерных программ, обеспечивающих проведение регрессионного статистического анализа, а также графического построения зависимостей потери массы от поверхностного содержания хлоридов, температуры и продолжительности испытаний.

### Результаты и обсуждение

При разработке ускоренного лабораторного метода прогнозирования коррозионной стойкости алюминиевых сплавов исходили из тех соображений, что в прибрежных районах с морским климатом влияние морской атмосферы можно свести (с некоторым допущением) к трем основным параметрам: скорости осаждения и способности удержания хлоридов, продолжительности увлажнения и температуре. Все остальные факторы, такие как роза ветров, солнечная радиация, относительная влажность воздуха,

осадки, роса, туман и др., находятся в непосредственной связи с тремя указанными выше параметрами. С учетом вышеизложенного при испытаниях применяли метод математического планирования эксперимента с использованием плана Вестлика для трех независимых переменных: температуры  $T$ , концентрации хлоридов  $C_{\text{NaCl}}$ , продолжительности увлажнения  $\tau$ .

План Вестлика близок по статистическим свойствам к  $D$ -оптимальному плану и предусматривает 15 экспериментальных точек с различной вариацией переменных. Число уровней варьирования переменных – три: максимальное, минимальное и среднее значение. При сравнительно небольшом количестве экспериментальных точек указанный план отличается достаточно высокой разрешающей способностью и минимальным количеством ошибок при оценке коэффициентов модели.

В соответствии с методикой эксперимента определена поверхностная концентрация хлоридов (табл. 1). Установлено, что с увеличением концентрации раствора NaCl, в котором выдерживали образцы, количество хлоридов, осаждающихся на металлической поверхности, возрастает с 1 до 53 г/м<sup>2</sup>.

Таблица 1

**Поверхностная концентрация хлорид-ионов**

Концентрация раствора NaCl, г/л	10	50	100
Поверхностная концентрация хлоридов, г/м <sup>2</sup>	1	27	53

На основании полученных данных поверхностной концентрации хлорид-ионов с учетом заданного интервала температур и продолжительности увлажнения составлена матрица эксперимента и подобраны режимы испытаний алюминиевых сплавов (табл. 2).

Таблица 2

**Математическое планирование эксперимента. Режимы испытаний**

Матрица плана В <sub>3</sub>			Режим испытаний		
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$C_{\text{Cl}}, \text{г/м}^2$	$T, \text{°C}$	$\tau, \text{сут}$
–	–	–	1	10	30
+	–	–	53	10	30
–	+	–	1	40	30
+	+	–	53	40	30
–	–	+	1	10	150
+	–	+	53	10	150
–	+	+	1	40	150
+	+	+	53	40	150
–	0	0	1	25	90
+	0	0	53	25	90
0	–	0	27	10	90
0	+	0	27	40	90
0	0	–	27	25	30
0	0	+	27	25	150
0	0	0	27	25	90

Полученные в ходе исследования данные по потере массы образцов алюминиевых сплавов марок В95-Т2 и 1424-ТГ1 после обработки в растворах NaCl и выдержки при разных режимах испытаний (в соответствии с планом Вестлика) представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Потеря массы образцов в зависимости от режима испытаний

Сплав В95-Т2				Сплав 1424-ТГ1			
$C_{Cl}$ , г/м <sup>2</sup>	$T$ , °С	$\tau$ , сут	$\Delta m$ , г/м <sup>2</sup>	$C_{Cl}$ , г/м <sup>2</sup>	$T$ , °С	$\tau$ , сут	$\Delta m$ , г/м <sup>2</sup>
1	10	30	0,0151	1	10	30	0,0042
53	10	30	0,0256	53	10	30	0,0112
1	40	30	0,0222	1	40	30	0,0063
53	40	30	0,0353	53	40	30	0,0335
1	10	150	0,0322	1	10	150	0,0085
53	10	150	0,085	53	10	150	0,085
1	40	150	0,0641	1	40	150	0,121
53	40	150	0,221	53	40	150	0,132
1	25	90	0,0287	1	25	90	0,0061
53	25	90	0,0742	53	25	90	0,0443
27	10	90	0,0322	27	10	90	0,0064
27	40	90	0,0472	27	40	90	0,0031
27	25	30	0,0335	27	25	30	0,0058
27	25	150	0,0922	27	25	150	0,0685
27	25	90	0,0421	27	25	90	0,0335

Через каждые 30 сут проводили осмотр образцов алюминиевых сплавов и фиксировали изменение и наличие коррозионных поражений на металлической поверхности. Результаты испытаний показали, что после 30 сут выдержки в коррозионной среде на всех образцах из сплава В95-Т2 наблюдается потемнение 100% поверхности, сопровождающееся образованием единичных коррозионных поражений в виде язв и питтингов, на образцах из сплава 1424-ТГ1 замечено небольшое потускнение поверхности. При дальнейшем увеличении продолжительности испытаний (до 90 сут), сопровождающемся повышением поверхностной концентрации хлоридов с 1 до 27 г/м<sup>2</sup>, отмечено увеличение количества коррозионных участков поверхности образцов из сплава В95-Т2 в среднем в 3 раза и появление отдельных очагов коррозии в виде питтингов на сплаве 1424-ТГ1. Дальнейшее повышение поверхностной концентрации хлоридов до 53 г/м<sup>2</sup> оказывает меньшее влияние на коррозионную стойкость исследуемых сплавов. После 120 и 150 сут испытаний выявлено значительное увеличение количества язв и питтингов на 100% поверхности сплава В95-Т2 и наличие локальных коррозионных поражений на сплаве 1424-ТГ1. Таким образом, согласно результатам периодического осмотра образцов из алюминиевых сплавов установлено, что наиболее сильное влияние на коррозионную стойкость оказывает содержание хлоридов на поверхности образцов, наносимых путем окунания в растворы NaCl с различной концентрацией. Особенно это заметно при температуре 25°С. Увеличение продолжительности выдержки образцов в коррозионной среде усиливает коррозию алюминиевых сплавов при повышенных температурах.

Металлографический анализ поверхности алюминиевых сплавов выявил на сплаве 1424-ТГ1 только общую коррозию, на сплаве В95-Т2 – общую и межкристаллитную коррозию.

Статистический анализ полученных данных проводили с помощью программ Statistica7, Statistica8 и MINITAB14. На основании анализа экспериментальных данных получены уравнения линейной регрессии:

– для сплава В95-Т2

$$m = -0,0598 + 0,000107C_{Cl} + 0,0012T + 0,0006\tau; \quad (2)$$

– для сплава 1424-ТГ1

$$m = -0,0618 + 0,00062C_{Cl} + 0,0012T + 0,0006\tau, \quad (3)$$

где  $C_{Cl}$  – поверхностная концентрация хлоридов, г/м<sup>2</sup>;  $T$  – температура, °С;  $\tau$  – продолжительность увлажнения, сут.

Пригодность полученных уравнений регрессии для оценки коррозионной стойкости алюминиевых сплавов В95-Т2 и 1424-ТГ1 определяли по проверке статистической значимости коэффициентов и общего качества уравнения. Значимость коэффициентов уравнения проверяли по  $t$ -критерию Стьюдента, который сравнивали с табличным значением исходя из принятого уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы  $f = n - 1$ , где  $n$  – число точек плана. Значения  $t$ -критерия для коэффициентов при первом, втором и четвертом членах уравнения оказались выше табличного значения, равного 2,1, для коэффициента при третьем члене – наоборот, несколько меньше табличного. Это означает, что температура оказывает гораздо меньшее влияние на коррозионную стойкость исследуемых алюминиевых сплавов по сравнению с продолжительностью увлажнения и поверхностным содержанием хлоридов.

Адекватность математической модели оценивали по значению  $F$ -критерия Фишера, рассчитанного для исследуемых алюминиевых сплавов В95-Т2 и 1424-ТГ1 – соответственно 7,83 и 6,67. Установлено, что  $F_{расч}$  для каждого сплава больше табличных значений  $F_{ст} = 2,48$ , что свидетельствует об адекватности полученной математической модели.

Поскольку множественную регрессию математической модели при наличии нескольких переменных удобнее анализировать, фиксируя один или несколько членов уравнения, проведен анализ зависимости коррозии от поверхностной концентрации хлоридов и продолжительности увлажнения при фиксированных значениях температуры. Полученные уравнения регрессии представлены в табл. 4. Видно, что все уравнения имеют достаточно высокие значения коэффициента детерминации и автокорреляции Датсона-Уотсона, которые не превышают допустимого значения 2,0, что свидетельствует о достаточно хорошей функциональной связи между потерей массы и параметрами  $C_{Cl}$ ,  $T$ ,  $\tau$ . Исключением является уравнение для сплава 1424-ТГ1 при фиксированной температуре 10°С.

На основании расчета  $F$ -критерия Фишера установлено, что все уравнения адекватны. Коэффициенты уравнений регрессии значимы по  $t$ -критерию Стьюдента, поскольку не превышают допустимого значения 2,1.

Таблица 4

**Зависимость коррозионных потерь от поверхностной концентрации хлоридов и продолжительности увлажнения поверхности при фиксированных значениях температуры**

Сплав	Температура испытания, °С	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2$	Коэффициент Датсона-Уотсона
В95-Т2	10	$m = -0,007 + 0,0006C_{Cl} + 0,0003\tau$	0,64	1,04
	25	$m = -0,0135 + 0,0009C_{Cl} + 0,0005\tau$	0,9	1,8
	40	$m = -0,0515 + 0,00163C_{Cl} + 0,0009\tau$	0,79	1,95
1424-ТГ1	10	$m = -0,0279 + 0,0008C_{Cl} + 0,0003\tau$	0,75	2,2
	25	$m = -0,0352 + 0,0007C_{Cl} + 0,0005\tau$	0,95	1,06
	40	$m = -0,0307 + 0,0004C_{Cl} + 0,0009\tau$	0,75	1,12

На рис. 1 и 2 приведены диаграммы уровней свойств – коррозионных потерь сплавов В95-Т2 и 1424-ТГ1 в зависимости от продолжительности увлажнения и поверхностной концентрации хлоридов при различных фиксированных значениях температуры.

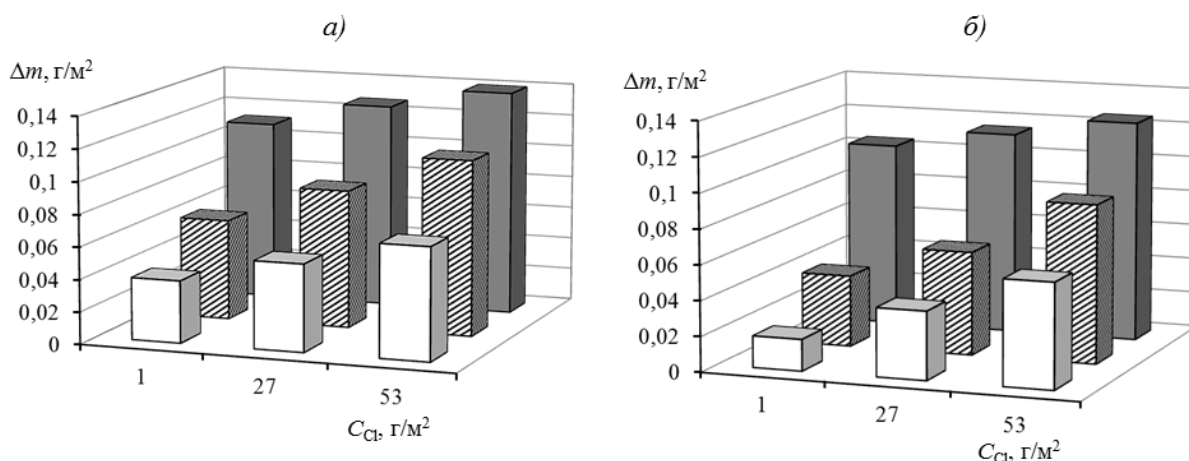


Рис. 1. Коррозионные потери алюминиевых сплавов В95-Т2 (а) и 1424-ТГ1 (б) при продолжительности увлажнения 90 сут в зависимости от поверхностной концентрации хлоридов ( $C_{Cl}$ ) при температуре 10 (□), 25 (▨) и 40°C (■)

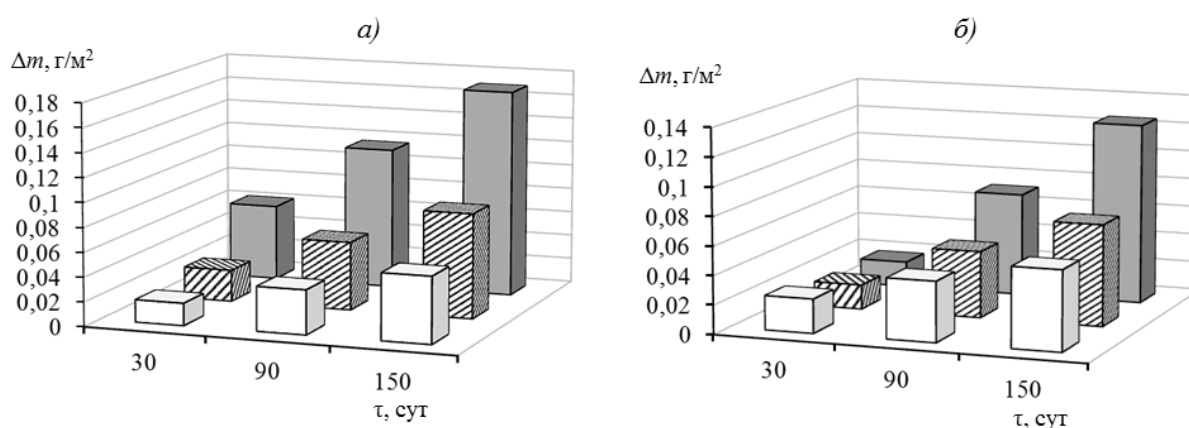


Рис. 2. Коррозионные потери алюминиевых сплавов В95-Т2 (а) и 1424-ТГ1 (б) при поверхностной концентрации хлоридов 27 г/м<sup>2</sup> в зависимости от продолжительности увлажнения поверхности образцов при температуре 10 (□), 25 (▨) и 40°C (■)

При анализе совместного влияния продолжительности увлажнения и концентрации хлоридов на коррозионную стойкость алюминиевых сплавов В95-Т2 и 1424-ТГ1 установлено, что при температурах 10–25°C на скорость коррозии наибольшее влияние оказывает поверхностное содержание хлоридов, а при повышении температуры до 40°C – продолжительность увлажнения металлической поверхности, что коррелирует с результатами коррозионных испытаний.

### Заключение

Предложена методика прогнозирования коррозионной стойкости алюминиевых сплавов В95-Т2 и 1424-ТГ1 в морской атмосфере с использованием математической модели. Предлагаемая методика позволяет по данным ускоренных лабораторных испытаний оценить устойчивость материала в заданных климатических условиях в зависимости от температуры, продолжительности увлажнения и поверхностного содержания хлоридов на металлической поверхности, что позволит с большей долей вероятности производить правильный выбор материалов для конкретных условий эксплуатации авиационной техники.

На основании экспериментальных данных установлено, что температура оказывает гораздо меньшее влияние на коррозионную стойкость исследуемых алюминиевых сплавов по сравнению с продолжительностью увлажнения и поверхностным содержанием хлоридов. Для каждого из исследуемых материалов выведены уравнения регрессии, устанавливающие зависимость коррозионных потерь сплавов В95-Т2 и 1424-ТГ1 от продолжительности увлажнения и поверхностной концентрации хлоридов. Однако полученные математические модели применимы к ограниченному числу материалов и требуют дальнейшего уточнения на основе большего массива экспериментальных данных с привлечением данных о различных марках алюминиевых сплавов.

## 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.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // *Автоматическая сварка*. 2013. №10. С. 23–32.
3. Каримова С.А., Кутырев А.Е., Фомина М.А., Чесноков Д.В. Моделирование процесса воздействия агрессивных компонентов промышленной атмосферы на металлические материалы в камере солевого тумана // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 86–94.
4. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // *Наука и жизнь*. 2012. №11. С. 16–21.
5. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
6. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // *Вестник Российской академии наук*. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
7. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №8. С. 157–167.
8. Панченко Ю.М., Ковтанюк В.В., Николаева Л.А. Долгосрочные прогнозы коррозионных потерь пластин и проволочных спиралей технически важных металлов в различных регионах мира. Ч. 2. // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №8. С. 8–15.
9. Михайловский Ю.Н., Стрекалов В.П., Агафонов В.В. Модель атмосферной коррозии металлов, учитывающая метеорологические и аэрохимические характеристики // *Защита металлов*. 1980. Т. 16. №4. С. 397–413.
10. Михайлов А.А., Стрекалов П.В. Моделирование атмосферной коррозии материалов и виды функций доза-ответ // *Коррозия: материалы, защита*. 2006. №3. С. 2–13.
11. Агафонов В.В. Разработка физико-математической модели атмосферной коррозии металлов и метода прогнозирования их коррозионной стойкости в различных климатических районах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: НИФХИ, 1978. 25 с.
12. Панченко Ю.М., Шувахина Л.А., Михайловский Ю.Н. Зависимость скорости атмосферной коррозии металлов от климатических условий районов Дальнего Востока // *Защита металлов*. 1984. Т. 20. №6. С. 851–863.
13. Стрекалов П.В., Ву Динь Вуй. Математическая модель и расчет вероятной скорости атмосферной коррозии металлов в тропическом и умеренном климате // *Защита металлов*. Т. 21. №4. С. 525–533.
14. Панченко Ю.М., Стрекалов П.В., Жиликов В.П., Каримова С.А., Березина Л.Г. Зависимость коррозионной стойкости сплава Д16 от засоленности и метеопараметров приморской атмосферы // *Коррозия: материалы, защита*. 2011. №8. С. 1–12.
15. Каримова С.А., Жиликов В.П., Михайлов А.А., Чесноков Д.В., Игонин Т.Н., Карпов В.А. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов в условиях воздействия морской атмосферы // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. №10. С. 1–3.