

УДК 519.6:620.1

Е.Н. Каблов¹, В.О. Старцев¹**ИЗМЕРЕНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ
ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭКСПОНИРОВАНИИ
В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58

Проведен анализ 6–8-летних измерений стандартных метеорологических показателей и температуры поверхности образцов из углепластика КМКУ-3.150.Э0.1, стеклопластика КМКС-4.175.Т10, алюминиевого сплава Д16-АТ с покрытиями ЭП-140 белого и черного цвета, экспонированных на открытых атмосферных стендах и под навесом в условиях Геленджикского и Московского центров климатических испытаний ФГУП «ВИАМ». Показана возможность достоверного прогнозирования температуры поверхности этих материалов в условиях различных климатических зон мультилинейной зависимостью, учитывающей показатели температуры воздуха, интенсивности солнечной радиации, углов склонения и высоты Солнца над горизонтом за период измерений 1–12 мес.

Ключевые слова: углепластик, стеклопластик, эпоксидное покрытие, температура поверхности, прогнозирование, мультилинейная модель, метеорологические показатели, достоверность.

Е.Н. Kablov¹, V.O. Startsev¹**MEASUREMENT AND FORECASTING OF MATERIALS SAMPLES'
TEMPERATURE DURING WEATHERING
IN DIFFERENT CLIMATIC ZONES**

The relation between standard meteorological parameters and surface temperature of samples exposed directly to the sun and in a sheltered environment has been studied using 6–8-year timeframe. The following materials have been used: KMKU-3.150.U0.1 carbon fiber reinforced polymer, KMKS-4.175.T10 glass fiber reinforced polymer, and D16-AT aluminum alloy substrate with black and white EP-140 epoxy coating. Outdoor weathering has been conducted at Gelendzhik and Moscow testing sites of the All-Russian Institute of Aviation Materials (VIAM). It has been shown that it's possible to use a multilinear model to estimate the temperature of the materials' surfaces during their weathering in different climatic regions. The following parameters for 1–12 months' timeline have been used to estimate samples' temperature at different locations: air temperature, total solar radiation, solar declination, and solar hour angle.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer, glass fiber reinforced polymer, epoxy coating, surface temperature, prognosis, multilinear model, meteorological parameters, validity.

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

Системный анализ климатической стойкости современных полимерных композиционных материалов (ПКМ), проведенный в работах [1–3], показал, что вероятность ухудшения их механических показателей при экспонировании в тропиках больше, чем в условиях воздействия других климатических зон. Однако нередко эффекты старения ПКМ в теплом, умеренном и даже холодном климате соизмеримы с воздействием тропиков [1]. Традиционные представления об уровне агрессивности воздействия внешней среды на полимерные

материалы нуждаются в уточнении влияния важнейшего фактора старения – температуры.

Обычно агрессивность климатического воздействия выбранного региона на ПКМ определяют по температуре воздуха. Например, для выявления закономерностей влагонасыщения эпоксидного углепластика в климатических зонах Нигерии, Германии, Англии, Сингапура, США, Бахрейна [4] использован анализ среднемесячной температуры. Этот же показатель характеризует условия мест 10-летнего экспонирования ПКМ в серии работ NASA [5–8]. Однако

уровни физико-химических превращений в ПКМ зависят от температуры экспонируемых образцов.

Ранее в работе [9] обсуждался эффект перегрева поверхности образцов ПКМ, вызванный солнечным облучением. Даже с учетом ночного времени, при котором не происходит нагрев солнечными лучами, среднесуточная температура образцов может превысить среднегодовую температуру более чем на 30 °С. Подобные эффекты должны учитываться при оценке агрессивности атмосферы. Например, используя данные работы [10] о температурном режиме углепластика КМКУ-3.150.Э0.1 в Геленджикском центре климатических испытаний ВИАМ (ГЦКИ ВИАМ) за 8-летний период наблюдений, показано [11], что на открытом атмосферном стенде в Геленджике образцы из углепластика при солнечном облучении более 1300 ч в год испытывают нагрев при температурах 30–60 °С. Из-за такого перегрева показатель климатического районирования Геленджика по ГОСТ 16350–80 для углепластика КМКУ-3.150.Э0.1 должен быть изменен с макроклиматического района 3 (теплый умеренный) на район 2 (теплый влажный).

Температура активизирует процессы старения [12] и коррозии [13] материалов. При увеличении температуры ускоряются деструкция и доотверждение полимеров и полимерных матриц ПКМ [14], влагоперенос [15] и другие физико-химические превращения [2, 9, 11] в соответствии с законом Аррениуса

$$\frac{dx}{dT} = A \cdot \exp\left(\frac{-E}{RT}\right), \quad (1)$$

где x – характеристика материала; A – константа; E – энергия активации процесса; T – температура; R – универсальная газовая постоянная.

Выбор режимов ускоренных испытаний на старение неметаллических материалов [16], обоснование их сроков эксплуатации [17], расчет скоростей коррозии металлов и сплавов [18] основываются на фундаментальном законе (1). Таким образом, получение сведений о реальной температуре поверхности T_s образцов различных материалов при экспонировании в натуральных условиях разных климатических зон является актуальной задачей.

Сравнение температуры поверхности материалов T_s с температурой воздуха проведено в ряде работ [19–22]. При испытаниях бетона, асфальта и других строительных материалов на горизонтальной площадке в Бразилии при температуре воздуха 22 °С температура поверхности образцов зависела от типа их поверхности и достигала 36–50 °С [19]. Основываясь на уравнении теплопроводности, в работе [20] оценили перегревы на

поверхности теплозащитных полимерных покрытий, которые в летние дни достигали 32 °С. Аналогичные перегревы поверхности покрытий при дневной температуре воздуха 32 °С составили 10–18 °С [21]. Образцы поливинилхлорида коричневого цвета с низкой отражательной способностью, экспонированные на открытом атмосферном стенде в Аризоне [22], нагревались до 80 °С при температуре воздуха 38 °С.

Рассмотренные прямые измерения температуры поверхности образцов за длительные периоды климатических испытаний материалов трудоемки и требуют значительных расходов, поэтому в работах [7–12] рассмотрены методики моделирования температуры экспонируемых образцов.

Для оценки температуры поверхности материалов T_s с покрытиями разного цвета авторы работы [23] использовали линейную регрессионную модель

$$T_s = T_a + \frac{aI}{h}, \quad (2)$$

где T_a – температура воздуха; a – коэффициент поглощения солнечной радиации; I – интенсивность солнечной радиации; h – теплопроводность материала.

Нормируя выполненные измерения на температуру поверхности «черного тела», показан линейный рост температуры образца зеленого цвета с 15 до 45 °С при изменении температуры воздуха с 3 до 33 °С в районе Миннесоты. Отклонение измеренных температур от рассчитанных составляло 3–6 °С. Модель (2) показала удовлетворительную корреляцию между температурой поверхности материала T_s , температурой воздуха и интенсивностью солнечной радиации при различных углах наклона поверхности образцов к горизонту, но не использовалась для прогнозирования.

В научно-технической литературе представлены модели, в которых температура T_s линейно зависит от температуры воздуха и квадратично – от интенсивности солнечной радиации [24], учитываются интенсивность солнечной радиации, температуры воздуха и поверхности почвы в момент измерений [25] и предшествующие интервалы времени [26]. Для расчета значений T_s использовали классические уравнения теплопроводности, излучения и другие физические законы [27–29]. С помощью предложенных в работах [24–29] подходов достигалось хорошее совпадение измеренных и аппроксимированных значений T_s . Однако применение описанных ранее методик для прогнозирования температуры поверхности материалов в натуральных

климатических условиях затруднено. Это вызвано недостатком статистических данных (не более 1 года, что не позволяет применять модели к длительным периодам) и тем, что образцы экспонировались в горизонтальном положении, в то время как по ГОСТ 9.906–83 экспозиция образцов производится под углом к горизонту.

В работах [10, 11, 30, 31] показана возможность прогнозирования температуры образцов нескольких материалов по результатам измерения стандартных метеорологических показателей без непосредственного ее измерения. С помощью мультилинейной зависимости, учитывающей значения температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, интенсивности солнечной радиации, положения Солнца на небосводе, доказана возможность достоверного прогнозирования температуры T_s в климатических условиях Геленджика.

Цель данной работы – проверка работоспособности предложенной мультилинейной модели для прогнозирования значений T_s на испытательной площадке Московского центра климатических испытаний ВИАМ (МЦКИ ВИАМ) и распространение этой методики для произвольных климатических зон земного шара.

Материалы и методы

Возможность достижения указанной цели основана на том, что в ГЦКИ ВИАМ и МЦКИ ВИАМ проведен эксперимент по единой методике, согласно которому в течение нескольких лет выполнялся непрерывный контроль температуры поверхности T_s образцов из углепластика КМКУ-3.150.Э0.1, стек-

лопластика КМКС-4.175.Т10 и алюминиевого сплава Д16-АТ с покрытиями ЭП-140 белого и черного цвета на открытых атмосферных стендах и под навесом (рис. 1 и 2).

Свойства покрытия ЭП-140 и ПКМ при 8-летнем экспонировании в климатических условиях ГЦКИ изменились незначительно [30, 31], что подтвердило хорошую работоспособность и чувствительность использованных термодатчиков (рис. 2) в течение длительной эксплуатации.

Усредненные годовые климатические показатели Геленджика и Москвы, измеренные автоматизированными метеорологическими комплексами СКМП-2 в ГЦКИ и МЦКИ [32, 33], представлены в табл. 1. Сравнение среднемесячных показателей (рис. 3) выявляет значительное превышение температуры воздуха во все месяцы года и более высокий уровень интенсивности солнечной радиации в весенние, осенние и зимние месяцы в ГЦКИ, а также отчетливо выраженные сезонные различия относительной влажности воздуха и уровня осадков.

Для статистического анализа выбраны метеорологические характеристики и показатели температуры поверхности образцов T_s , измеренные с периодичностью 3 измерения в час комплексами СКМП-2 в ГЦКИ с июля 2010 г. по октябрь 2018 г. (более 8 лет) и в МЦКИ с января 2013 г. по декабрь 2018 г. (6 лет). После удаления выбросов и ошибок измерений (алгоритм фильтрации рассмотрен в работе [31]) массив данных включал для каждого из четырех материалов: 58222 строки из 14 показателей – в ГЦКИ и 54400 аналогичных строк – в МЦКИ.



Рис. 1. Внешний вид образцов углепластика КМКУ-3.150.Э0.1 (1), стеклопластика КМКС-4.175.Т10 (2) и алюминиевого сплава Д16-АТ с покрытием ЭП-140 черного (3) и белого (4) цвета, снабженных термодатчиками температуры поверхности при экспонировании на открытом стенде МЦКИ ВИАМ



Рис. 2. Термодатчик, закрепленный на необлучаемой Солнцем поверхности стеклопластика КМКС-4.175.Т10

Таблица 1

Усредненные годовые показатели климата Геленджика и Москвы

Показатель	Значения показателей для	
	Геленджика	Москвы
Среднегодовая температура воздуха, °С	14,8	7,7
Среднемаксимальная температура воздуха, °С	24,8	10,9
Среднеминимальная температура воздуха, °С	5,0	4,5
Среднегодовая относительная влажность воздуха, %	73	71,3
Годовое суммарное количество осадков, мм	665	486
Годовое суммарное количество дней с осадками	114	146
Годовое суммарное количество солнечных дней	275	91
Годовая величина суммарной солнечной радиации, МДж/м ²	5070	4350
Ультрафиолетовая составляющая солнечной радиации, МДж/м ²	232	134
Среднегодовая скорость ветра, м/с	3,5	1,5
Расчетная продолжительность увлажнения поверхности, ч: при $T \geq -1$ °С и $\varphi \geq 70\%$ при $T \geq 0$ °С и $\varphi \geq 80\%$	5400 3500	3690 2280
Суточный перепад температуры образца черного цвета в летние солнечные дни, °С	35	31
Годовое количество дней с отрицательными температурами	26	124

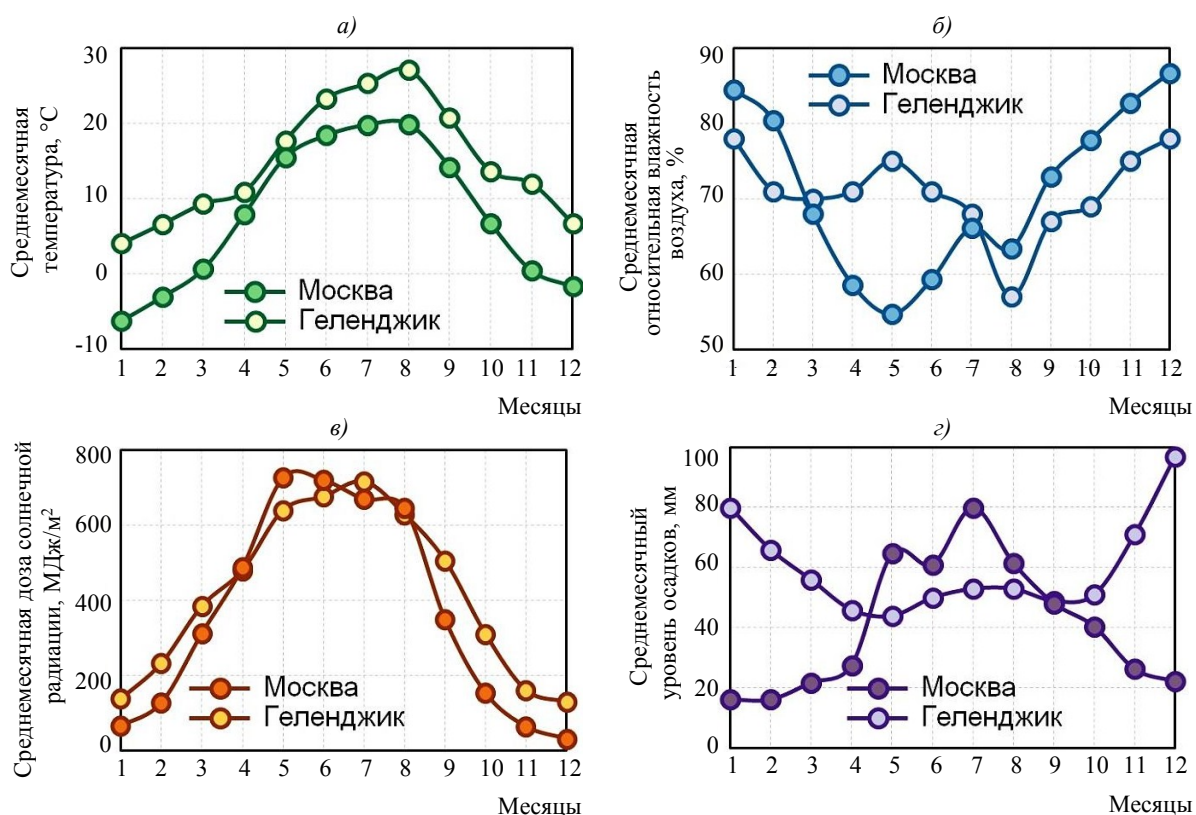


Рис. 3. Среднемесячные климатические показатели Москвы и Геленджика: температура воздуха (а), относительная влажность воздуха (б), доза суммарной солнечной радиации (в) и количество осадков (г)

Результаты и обсуждение

На рис. 4 показаны климатограммы ГЦКИ и МЦКИ по ГОСТ 16350–80, рассчитанные с использованием полного массива накопленных метеорологических данных, с учетом температуры воздуха и температуры образца (алюминиевый сплав Д16-АТ с покрытием ЭП-140 черного цвета).

Наблюдается существенное смещение границ разграничительных линий, устанавливающих диапазоны сочетаний «среднегодовая относительная влажность–среднегодовая температура» по ГОСТ 15150–69, в сторону

более высоких температур. На рис. 5 показано, что для образцов из алюминиевого сплава Д16-АТ с покрытием ЭП-140 черного цвета жесткость климатического воздействия в Геленджике возрастает с макроклиматического показателя 3 (теплый умеренный) к показателю 2 (теплый влажный), а в Москве, соответственно, – с показателя 4 (умеренный) к показателю 3 (теплый умеренный).

Для прогнозирования температуры поверхности испытываемых образцов по аналогии с работами [10, 11, 30, 31] использована мультилинейная зависимость

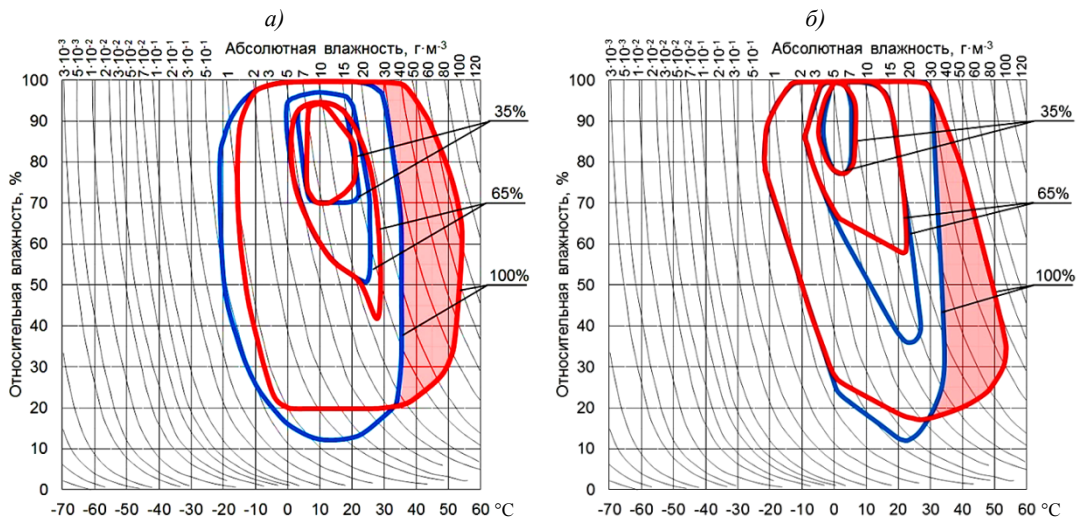


Рис. 4. Климатограммы Геленджика (а) и Москвы (б) с учетом температуры воздуха (—) и температуры образца (—) из алюминиевого сплава Д16-АТ с покрытием ЭП-140 черного цвета (■ – неучитываемый перегрев)

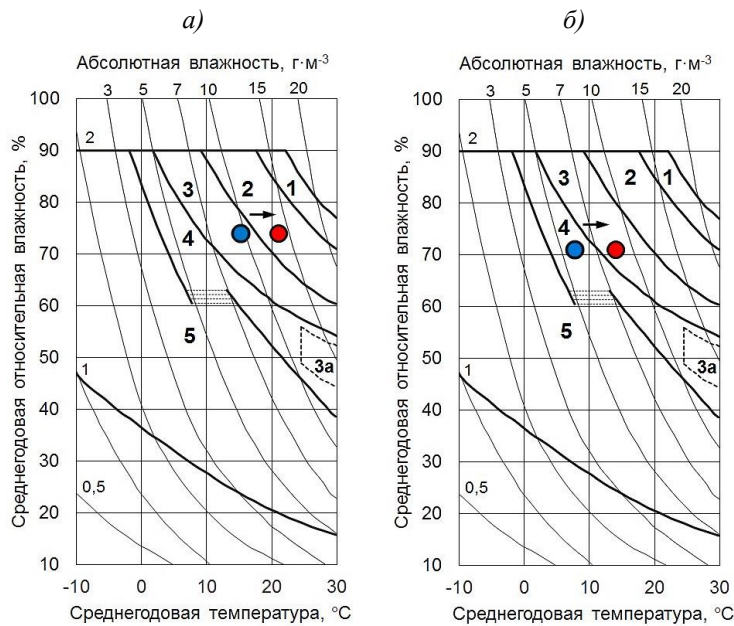


Рис. 5. Изменение макроклиматического показателя в Геленджике (а) и Москве (б) при учете реальной температуры образца (●) из алюминиевого сплава Д16-АТ с покрытием ЭП-140 черного цвета (● – температура воздуха)

$$T_s = B_0 + \sum_{k=1}^K B_{ink} x_{nk}, \quad (3)$$

где T_s – отклик задачи (вычисляемая температура поверхности образца); x – климатические факторы (температура воздуха; вторая и четвертая степени температуры воздуха; относительная влажность воздуха; плотность потока суммарной и УФ-компоненты солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность и поверхность под наклоном 45 градусов к горизонту; давление; количество осадков; скорость и направление ветра; углы склонения и высоты Солнца над горизонтом); $i=1 \dots 6$ (тип материала и тип экспонирования – открытый стенд, навес); $n=1, 2$ – место экспонирования (ГЦКИ, МЦКИ); B_{ink} – варьируемые параметры модели.

На всем массиве данных произведен перебор сочетаний факторов для каждого откли-

ка. Критерий выбора – максимум коэффициента детерминированности на участке прогнозирования. Тестируемый временной участок делится на две части (75% – аппроксимация, 25% – прогноз). Число перебранных вариантов сочетаний факторов m :

$$m = \sum_{n=1,2} \sum_{i=1} \sum_{j=1} C_j^j = 196596, \quad C_j^j = \frac{J!}{(J-j)! \cdot j!}, \quad (4)$$

где $n=1, 2$ – место экспонирования (ГЦКИ, МЦКИ); $i=6$ – общее количество откликов в одном месте экспонирования; $j=14$ – общее количество учтенных климатических факторов; C_j^j – число сочетаний.

Расчеты показали, что по модели (3) с хорошей точностью можно прогнозировать температуру поверхности образцов как в Геленджике, так и в Москве. На рис. 6

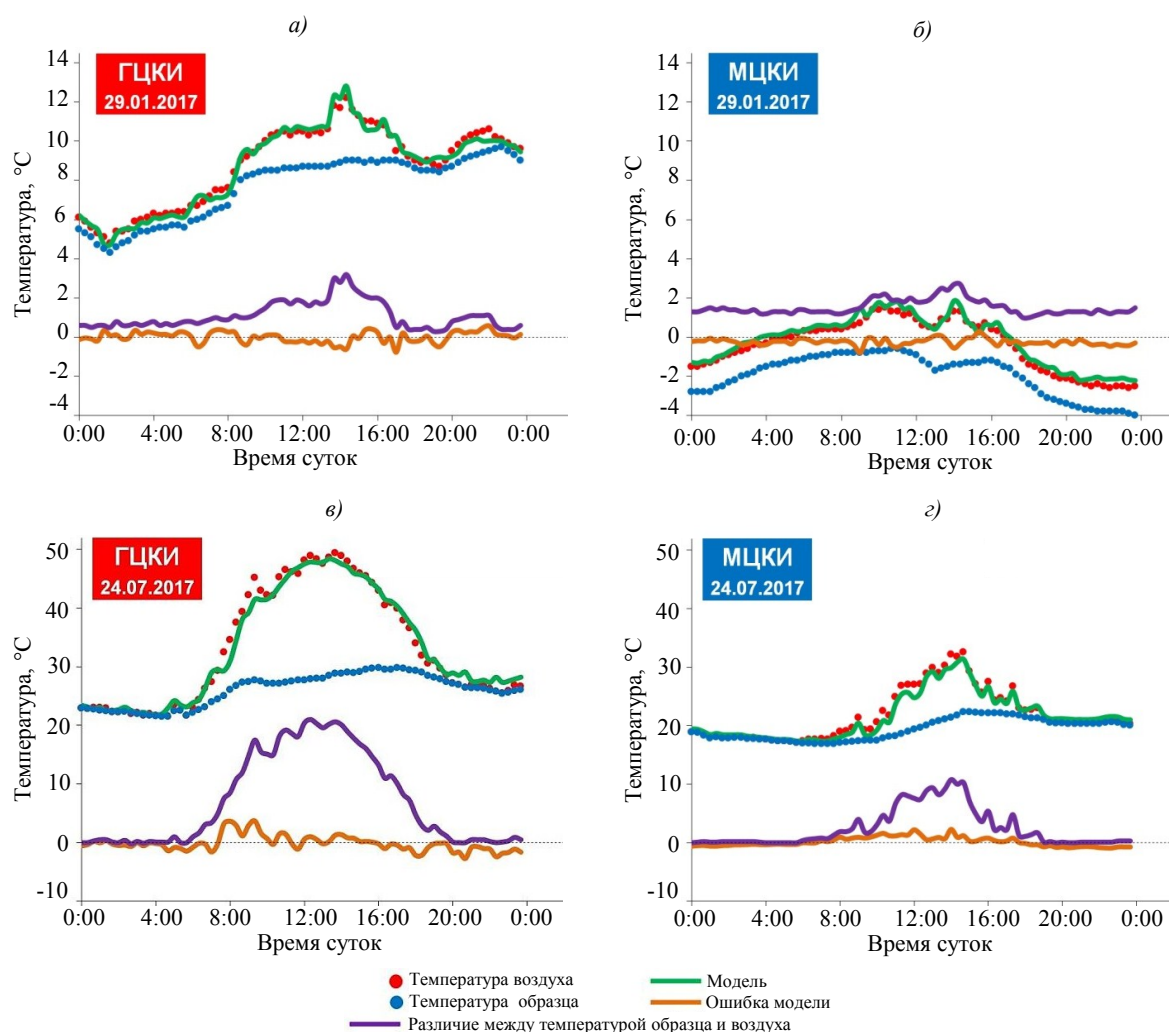


Рис. 6. Сравнение прогнозной и измеренной температуры образцов из алюминиевого сплава Д16-АТ с покрытием ЭП-140 черного цвета в зимнее (а, б) и летнее время (в, з) в ГЦКИ (а, в) и МЦКИ (б, з)

Таблица 2

**Статистические данные* по прогнозу температуры образцов
из алюминиевого сплава Д16-АТ с эпоксидным покрытием ЭП-140 белого и черного цвета
в Геленджике и Москве при различных сочетаниях показателей по модели (3)**

Контролируемые показатели	Ошибка прогноза для покрытий разного цвета, °С		Коэффициент R^2 прогноза для покрытий разного цвета	
	белый	черный	белый	черный
Солнечная радиация, положение Солнца	5,2/7,0	5,4/7,8	0,64/0,67	0,66/0,77
Температура воздуха, положение Солнца	1,3/1,9	2,6/5,6	0,97/0,97	0,93/0,87
Солнечная радиация, температура воздуха, положение Солнца	0,9/1,3	1,6/3,0	0,98/0,98	0,97/0,96
Солнечная радиация, температура воздуха, положение Солнца, влага	0,9/1,3	1,6/3,0	0,98/0,98	0,97/0,96
Все показатели	0,7/1,1	1,5/2,8	0,86/0,87	0,85/0,86

* В числителе – для Геленджика, в знаменателе – для Москвы.

показано сравнение измеренной температуры образцов из алюминиевого сплава Д16-АТ с покрытием ЭП-140 черного цвета в ГЦКИ и МЦКИ с прогнозируемой температурой, вычисленной по модели (1) с использованием 14 метеорологических показателей. Для аппроксимации модели использовано 75% времени тестовых измерений. Ошибка прогнозирования в различное время суток не превышает 1,6 °С в ГЦКИ и 3,0 °С в МЦКИ.

В табл. 2 представлены статистические данные по прогнозу температуры образцов из алюминиевого сплава Д16-АТ с эпоксидным покрытием ЭП-140 белого и черного цвета в ГЦКИ и МЦКИ при различных сочетаниях показателей по модели (3). Подобно результатам, полученным в работе [31], выявлена значимость влияния плотности потока солнечной радиации и положения Солнца на небосклоне. Однако если учитывать только эти два критерия, то температуру образцов можно прогнозировать с ошибкой в 5–8 °С при низком коэффициенте детерминированности R^2 – от 0,64 до 0,77. Если при аппроксимации учитываются показатели солнечной радиации, положения Солнца на небосклоне и температурные показатели, то ошибка прогнозирования снижается до 0,9–1,3 °С для покрытия белого цвета и до 1,6–3,0 °С для покрытия черного цвета, а коэффициент детерминированности прогноза возрастает до 0,96–0,98, что доказывает высокую достоверность модели.

Этот результат имеет большое практическое значение. Как видно из данных, приведенных в табл. 2, для прогнозирования температуры поверхности образцов исследуемого материала с удовлетворительной точностью из всего набора контролируемых метеорологических показателей достаточно накопить

информацию о температуре воздуха, плотности потока/интенсивности солнечной радиации и положении Солнца, которое зависит от времени года и выбранного места проведения испытаний. Другие метеорологические показатели (из числа 14, проверенных в данной работе) могут быть использованы при прогнозировании, если требуется минимизировать ошибки прогноза с закономерным снижением в этом случае коэффициента детерминированности.

Наиболее важным результатом проведенного анализа является подтвержденная способность по модели (3) прогнозировать температуру испытываемых образцов при экспонировании в выбранной климатической зоне с варьируемыми параметрами модели B_{ink} по результатам аппроксимации в другой зоне. Проиллюстрируем это на примере стеклопластика КМКС-4.175.Т10 (табл. 3).

Если наилучшие параметры модели (3) подобраны за год из массива предварительных измерений метеорологических показателей в ГЦКИ, то при прогнозе температуры образцов из стеклопластика КМКС-4.175.Т10 в ГЦКИ ошибка составляет 0,9 °С. Качество прогноза этой модели при сопоставлении с результатами измерений в МЦКИ увеличивает ошибку незначительно – до 1,9 °С. Модель (3), построенная по метеорологическим показателям МЦКИ, дает ошибку прогноза для МЦКИ величиной 1,1 °С и несущественно увеличивает эту ошибку (до 1,3 °С) для ГЦКИ. Аналогичные результаты получены для случая увеличения периода аппроксимации на все время наблюдений (табл. 3).

Еще одним важным результатом проведенного исследования является универсальность модели (3) при варьировании периодов аппроксимации. Как видно из

Таблица 3

Сравнение прогноза температуры образцов из стеклопластика КМКС-4.175.Т10 при экспонировании на открытых стендах в ГЦКИ и МЦКИ при использовании параметров модели (3) по метеорологическим показателям ГЦКИ и МЦКИ

Период аппроксимации	Показатели прогноза	Параметры модели по метеорологическим показателям ГЦКИ		Параметры модели по метеорологическим показателям МЦКИ	
		прогноз для ГЦКИ	прогноз для МЦКИ	прогноз для МЦКИ	прогноз для ГЦКИ
Год	Разброс, °С	0,92	1,9	1,1	1,3
	R^2	0,97	0,89	0,89	0,88
Весь период	Разброс, °С	0,93	2,4	1,5	1,5
	R^2	0,98	0,92	0,96	0,92

данных, приведенных в табл. 4, точность и достоверность прогнозирования сохраняются на хорошем уровне, если использовать для аппроксимации 75% времени от всего периода наблюдений или выбирать отрезки времени продолжительностью год, квартал, месяц. Эта возможность проанализирована в работе [31], в которой показано, что для минимизации погрешности прогноза целесообразно использовать параметры модели (3), полученные при аппроксимации тестовых измерений в соответствующий месяц любого года измерений.

Справедливость этого вывода на примере углепластика КМКУ-3.150.Э0.1 иллюстрирует рис. 7, на котором сопоставлены прогнозные и измеренные температуры образцов в зимние и летние сутки при использовании

для аппроксимации 75% тестовых измерений в январе и июле 2018 года.

Рассмотренные ранее результаты дают возможность оценить температуры поверхности образцов конкретного материала в произвольной климатической зоне земного шара с помощью мультилинейной зависимости (3). Для этого достаточно знать географические координаты этого места экспозиции, чтобы учитывать углы склонения, азимут и угол подъема Солнца над горизонтом [30], а также справочные сведения о температуре и плотности потока солнечной радиации в требуемое время суток. Параметры модели B_{ink} для заданного материала могут быть получены при аппроксимации результатов тестовых измерений в базовом испытательном центре (ГЦКИ, МЦКИ и др.). Примером

Таблица 4

Статистические данные по прогнозу температуры образцов, испытанных на открытых атмосферных стендах ГЦКИ и МЦКИ, по модели (1) при различных периодах аппроксимации

Материал	Место экспозиции	Значения показателей достоверности прогноза по модели (1) по периодам*				
		весь период	год	квартал	месяц	
Углепластик КМКУ-3.150.Э0.1	ГЦКИ	1,3/0,98	1,3/0,95	1,2/0,93	0,37/0,91	
	МЦКИ	2,2/0,97	1,0/0,93	1,0/0,80	0,66/0,92	
Стеклопластик КМКС-4.175.Т10	ГЦКИ	0,84/0,99	0,92/0,97	0,86/0,96	0,87/0,93	
	МЦКИ	1,2/0,87	1,1/0,74	1,1/0,72	0,95/0,90	
Сплав Д16-АТ с покрытием ЭП-140: белого цвета	ГЦКИ	0,94/0,98	0,98/0,97	0,90/0,95	0,89/0,92	
	МЦКИ	1,3/0,98	1,1/0,96	1,1/0,78	1,1/0,91	
	черного цвета	ГЦКИ	1,7/0,97	1,6/0,95	1,9/0,73	1,6/0,89
		МЦКИ	3,1/0,96	1,9/0,86	1,9/0,73	1,6/0,86

* В числителе – ошибка прогноза, °С; в знаменателе – коэффициент детерминированности прогноза R^2 .

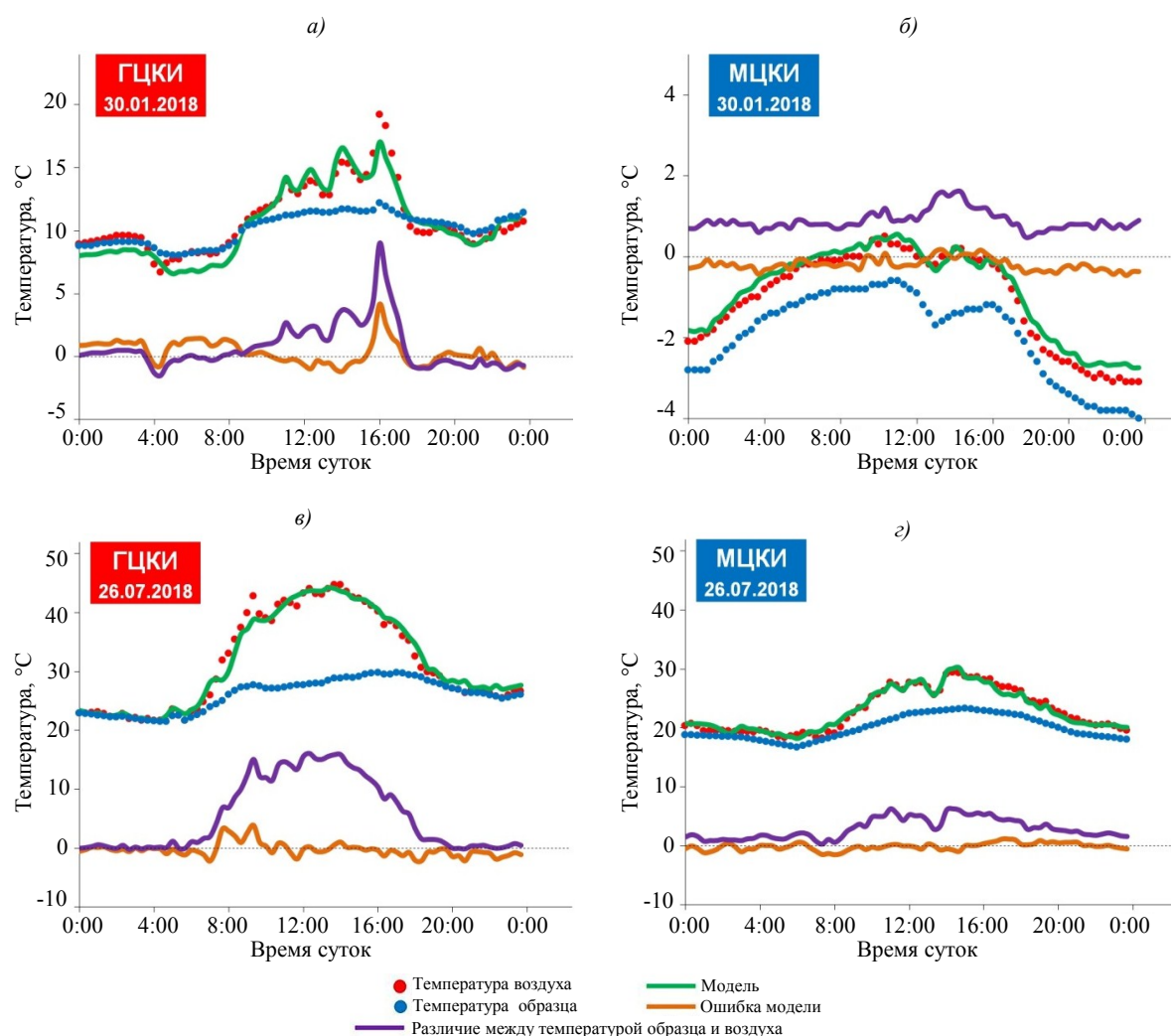


Рис. 7. Сравнение прогнозной и измеренной температуры образцов из углепластика КМКУ-3.150.Э0.1 при экспонировании на открытых атмосферных стендах 30.01.2018 года (а, б) и 26.07.2018 года (в, г) в ГЦКИ (а, в) и МЦКИ (б, г); для аппроксимации использовалось 75% измерений

такой оценки являются данные, приведенные в табл. 5, в которой представлена расчетная оценка температуры поверхности образца из сплава Д16-АТ с покрытием ЭП-140 черного цвета в теплый день года по модели (3) в традиционных и перспективных местах климатических испытаний авиационных материалов ФГУП «ВИАМ». Видно, что температура поверхности образца изменяется в диапазоне 39–56,5 °С в зависимости от места экспонирования. При этом разности температуры поверхности образца и среднегодовой температуры места экспонирования образца составляют от 13 до 53 °С.

Заключения

Проведен анализ 6–8-летних измерений стандартных метеорологических показателей и температуры поверхности образцов из уг-

лепластика КМКУ-3.150.Э0.1, стеклопластика КМКС-4.175.Т10, алюминиевого сплава Д16-АТ с эпоксидным покрытием ЭП-140 белого и черного цвета, экспонированных на открытых атмосферных стендах и под навесом в условиях Геленджикского и Московского центров климатических испытаний ВИАМ.

Показана возможность точного и достоверного прогнозирования температуры исследованных материалов с помощью мультилинейной зависимости (3), параметры которой определяются при аппроксимации тестовых измерений метеорологических показателей и температуры поверхности испытываемых образцов.

Доказано, что модель (3) пригодна для прогнозирования температуры исследуемых образцов при экспонировании в выбранной климатической зоне с варьируемыми

Оценка температуры поверхности образца из алюминиевого сплава Д16-АТ с эпоксидным покрытием ЭП-140 черного цвета в теплый день года по модели (1) в различных климатических зонах

Город, район (страна)	Средняя температура воздуха, °С	Температура поверхности образца, °С	Разность температур, °С
Ханой (Вьетнам)	24,2	44,3	20,1
Хошимин (Вьетнам)	27,4	42,4	15,0
Нячанг (Вьетнам)	26,9	42,0	15,1
Сьенфуэргос (Куба)	25,2	42,5	17,3
Цюнхай, Хайнань (Китай)	24,0	44,1	20,1
Ваньнин, Хайнань (Китай)	25,9	39,1	13,2
Майами, Флорида (США)	24,2	41,8	17,6
Феникс, Аризона (США)	21,5	56,5	35,0
Термез (Узбекистан)	17,1	53,2	36,1
Джида (Саудовская Аравия)	28,0	55,5	27,5
Йезд (Иран)	18,9	47,5	28,7
Мурманск (РФ)	-0,2	40,3	40,5
Якутск (РФ)	-10,2	42,8	53,0
Казань (РФ)	3,8	40,1	36,3
Москва (РФ)	7,7	39,6	31,9
Саранск (РФ)	4,3	42,0	37,7
Владивосток (РФ)	4,9	39,5	34,6
Геленджик (РФ)	14,8	45,0	30,2
Сочи (РФ)	14,2	40,8	26,6

параметрами модели B_{ink} по результатам аппроксимации в другой зоне.

Информация о температуре образцов при климатических испытаниях может быть использована для уточнения механизмов старения полимеров и ПКМ на ранних стадиях старения [3, 34], для прогнозирования [35, 36] и выявления причин аномального измене-

ния прочности ПКМ в различных климатических зонах [1, 2, 37–40], для расчетов режимов ускоренных климатических испытаний материалов [11, 17] и др.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-18029.

Библиографический список

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. 1. Оценка влияния значимых факторов воздействия // *Деформация и разрушение материалов*. 2019. №12. С. 7–16.
4. Collings T.A. The effect of observed climatic conditions in the moisture equilibrium level of fibre-reinforced plastics // *Composites*. 1986. Vol. 17. No. 1. P. 33–41.
5. Gibbins M.N., Hoffman D.J. Environmental exposure effects on composite materials for commercial aircraft: NASA Contractor Report 3502. Washington D. C., 1982. 87 p.
6. Dexter H.B. Long-term environmental effects and flight service evaluation of composite materials: NASA Technical Report TM-89067. Washington D. C., 1987. 188 p.
7. Hoffman D.J., Bielawski W.J. Environmental exposure effects on composite materials for commercial aircraft: NASA Technical Report CR-187478. Washington D. C., 1990. 129 p.

8. Baker D.J. Ten-Year Ground Exposure of Composite Materials Used on the Bell Model 206L Helicopter Flight Service Program: NASA Technical Paper 3468. Washington D. C., 1994. 54 p.
9. 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.
10. Старцев В.О., Куцевич К.Е., Хрулёв К.А., Молоков М.В. Прогнозирование температуры поверхности композиционных материалов на основе клеевых препрегов при экспонировании в климатических условиях // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. №9. С. 24–31.
11. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно-теплом климате: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
12. Pochiraju K.V., Schoepner G.A., Tandon G.P. Long-Term Durability of Polymeric Matrix Composites // Long-Term Durability of Polymeric Matrix Composites / ed. K.V. Pochiraju, G.P. Tandon, G.A. Schoepner. Boston: Springer, 2012. 677 p.
13. Soares C.G., Garbatov Y., Zayed A., Wang G. Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere // Corrosion Science. 2009. Vol. 51. No. 9. P. 2014–2026.
14. Ray B.C., Rathore D. Environmental Damage and Degradation of FRP Composites: A Review Report // Polymer Composites. 2015. Vol. 36. No. 3. P. 410–423.
15. Blikstad M., Sjöblom P.O.W., Johannesson T.R. Long-Term Moisture Absorption in Graphite/Epoxy Angle-Ply Laminates // Journal of Composite Materials. 1984. Vol. 18. No. 1. P. 32–46.
16. Vodichka R. Accelerated environmental testing of composite material. Melbourn: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1998. P. 57.
17. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Гращенко Д.В. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №6 (42). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-11-11.
18. Cao M., Liu L., Lei F. et al. Influence of temperature on corrosion behavior of 2A02 Al alloy in marine atmospheric environments // Materials. 2018. Vol. 11. No. 2. P. 22.
19. Castro L.C., Degues K.M., Cypriano M.G. et al. Evaluation of the thermal performance of different cold materials for urban paving // Ceramica. 2017. Vol. 63. No. 366. P. 203–209.
20. Zhang Y., Long E., Li Y., Li P. Solar radiation reflective coating material on building envelopes: Heat transfer analysis and cooling energy saving // Energy Exploration & Exploitation. 2017. Vol. 35. No. 6. P. 748–766.
21. Wang J., Zhang Z., Guo D., Xu C., Zhang K. Study on cooling effect and pavement performance of thermal-resistant asphalt mixture // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 2018. Article ID 6107656. DOI: 10.1155/2018/6107656.
22. Schulz U. Accelerated testing: nature and artificial weathering in the coatings industry // American coatings literature. 2009. 187 p.
23. Fisher R.M., Ketola W.D. Surface temperatures of materials in interior exposures and accelerated tests // Accelerated and outdoor durability testing of organic materials / ed. W.D. Ketola, D. Grossman. Philadelphia, USA, 1994. P. 88–114.
24. Pickett J.E., Sargent J.R. Sample temperatures during outdoor and laboratory weathering exposures // Polymer Degradation and Stability. 2009. Vol. 94. P. 189–195.
25. Bijl P., Heikkilä A., Syrjälä S., Aarva A., Poikonen A. Modelling of sample surface temperature in an outdoor weathering test // Polymer Testing, 2011. Vol. 30. P. 485–492.
26. Myers D. Predicting temperatures of exposure panels: models and empirical data // ACS Symposium Series. 1999. Vol. 722. P. 71–84.
27. Al-Rawahi N., Zurigat Y., Al-Azri N. Prediction of hourly solar radiation on horizontal and inclined surfaces for Muscat/Oman // The Journal of Engineering Research. 2011. Vol. 8. No. 2. P. 19–31.
28. Burch D., Martin J., VanLandingham M. Computer analysis of a polymer coating exposed to field weather conditions // Journal of Coatings. 2002. Vol. 74. No. 1. P. 75–86.
29. Burch D., Martin J. Predicting the temperature and relative humidity of polymer coatings in the field // ACS Symposium Series. 1999. Vol. 722. P. 85–107.
30. Старцев О.В., Медведев И.М., Кротов А.С., Панин С.В. Зависимость температуры поверхности образцов от характеристик климата при экспозиции в натуральных условиях // Коррозия: материалы, защита. 2013. №7. С. 43–47.
31. Старцев В.О., Медведев И.М., Старцев О.В. Прогнозирование температуры образцов алюминиевого сплава с эпоксидным покрытием при длительном экспонировании в натуральных климатических условиях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №10 (46). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-12-12.

32. 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.
33. Панин С.В., Старцев В.О., Курс М.Г., Варченко Е.А. Развитие методов климатических испытаний материалов для машиностроения и строительства в ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. №10. С. 50–61.
34. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2014. №7. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-9-9.
35. Булманис В.Н., Старцев О.В. Прогнозирование изменения прочности полимерных волокнистых композитов в результате климатического воздействия. Якутск: Якутский филиал СО АН СССР; Институт физико-технических проблем Севера, 1988. 32 с.
36. *Service Life Prediction of Polymers and Plastics Exposed to Outdoor Weathering* / ed. C.C. White, K.M. White, J.E. Pickett. Elsevier, 2018. 342 p.
37. Vapirov Y.M., Krivonos V.V., Startsev O.V. Interpretation of the anomalous change in the properties of carbon-fiber-reinforced plastic KMU-1u during aging in different climatic regions // *Mechanics of Composite Materials*. 1994. Vol. 30. No. 2. P. 190–194.
38. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K. Development of climatic tests of polymer materials for extreme operating conditions // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 20. P. 81–86.
39. Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // *Известия Алтайского государственного университета*. 2020. №1 (111). С. 41–51.
40. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Колпачков Е.Д. Термодинамические характеристики старения полимерных композиционных материалов в условиях реальной эксплуатации // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №3 (52). С. 80–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88.