
Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-135-144

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПЕРЕГРЕВА ОБРАЗЦОВ ПВХ-ПРОФИЛЯ

С.В. Панин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

***Аннотация.** Основной целью данной работы являлось моделирование температур максимального нагрева образцов из ПВХ-профиля в климатических условиях города Геленджика, а также в других климатических условиях (город Москва). Проведена оценка максимальных температур нагрева поверхности образцов ПВХ-профиля, имеющих сложную пространственную форму, оценены различные подходы к их моделированию и прогнозированию в других климатических условиях. Отмечено возможное влияние формы образцов на процессы их теплообмена с окружающей средой.*

***Ключевые слова:** натурные климатические испытания, конструктивно-подобные образцы, ПВХ-профиль, нагрев поверхности, перегрев поверхности, моделирование, прогнозирование*

***Для цитирования:** Панин С.В. Моделирование и прогнозирование температур перегрева образцов ПВХ-профиля // Труды ВИАМ. 2022. № 3 (109). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-135-144.*

Scientific article

MODELING AND PREDICTION OF OVERHEATING TEMPERATURES OF PVC PROFILE SAMPLES

S.V. Panin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

***Abstract.** The main purpose of this work was to simulate the temperatures of maximum heating of PVC-profile samples in the climatic conditions of the city of Gelendzhik and their modeling in other climatic conditions (the city of Moscow). The work evaluates the maximum heating temperatures of the surface of PVC-profile samples having a complex spatial shape, evaluates various approaches to its modeling and forecasting in other climatic conditions. The possible influence of the shape of the samples on the processes of their heat exchange with the environment is noted.*

***Keywords:** full-scale climatic tests, structurally similar samples, PVC-profile, surface heating, surface overheating, modeling, forecasting*

***For citation:** Panin S.V. Modeling and prediction of overheating temperatures of PVC profile samples. *Trudy VIAM*, 2022, no. 3 (109), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-135-144.*

Введение

При оценке работоспособности материалов в процессе испытаний в натуральных климатических условиях необходимо не только оценивать изменение их служебных характеристик в ходе экспозиции, но и обладать сведениями о комплексе воздействующих метеопараметров, особенно об их экстремальных значениях. Так, в процессе проектирования изделий, эксплуатируемых в различных климатических районах, конструктору необходимо не только закладывать в ожидаемые условия эксплуатации конструкции значения воздействующих метеопараметров (минимальные и максимальные температуры воздуха, порывы ветра, количество атмосферных осадков, дозы солнечной радиации и т. д.), но и учитывать, к каким экстремальным режимам эксплуатации приведет воздействие этих метеопараметров на саму конструкцию [1–4].

Использование при оценке условий эксплуатации конструкции только температуры окружающей среды недостаточно для достоверной оценки реальных режимов ее работы, так как за счет нагрева поверхности солнечным излучением разница между температурой воздуха и поверхностью образца может достигать 30–45 °С [5, 6]. Во многих работах также отмечена важность учета температуры поверхности образцов на скорость протекания коррозии [7–9]: повышение температуры увеличивает скорость коррозионного процесса до начала испарения фазовой пленки влаги и замедляет – когда температура достаточна для испарения влаги с поверхности образца [7]. Примеры физического моделирования представлены в работах [10–14].

Моделирование условий эксплуатации образцов материалов и конструкций в различных климатических зонах по результатам натурной экспозиции позволяет сократить трудозатраты на проведение испытаний. В работе [15] для моделирования и прогнозирования температуры поверхности плоских образцов прямоугольной формы из углепластика КМКУ-3.150.Э0.1, стеклопластика КМКС-4.175.Т10 и алюминиевого сплава Д16-АТ с покрытиями ЭП-140 белого и черного цвета в условиях городов Геленджик (ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова – НИЦ «Курчатовский институт» (ГЦКИ ВИАМ)) и Москва (МЦКИ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» (МЦКИ ВИАМ)) использована мультилинейная модель. Доказана способность с ее помощью прогнозировать температуру испытываемых образцов при экспонировании в выбранной климатической зоне с варьируемыми параметрами модели по результатам аппроксимации в другой зоне. По результатам экспозиции образцов в ГЦКИ ВИАМ и МЦКИ ВИАМ смоделированы температуры их поверхности в зависимости от комплексов воздействующих метеопараметров. При прогнозе температуры образцов из стеклопластика КМКС-4.175.Т10 в ГЦКИ ВИАМ ошибка составила 0,9 °С. Прогноз модели при сопоставлении с фактическими результатами измерений в МЦКИ ВИАМ увеличил ошибку до 1,9 °С. Модель, построенная по метеорологическим показателям МЦКИ ВИАМ, дала ошибку прогноза: для МЦКИ ВИАМ – 1,1 °С; 1,3 °С – для ГЦКИ ВИАМ.

В данной работе использованы подходы, изложенные в работах [2, 15], для моделирования и прогнозирования максимальных температур нагрева образцов из ПВХ-профиля сложной формы (по сравнению с испытываемыми обычно плоскими тонкими образцами прямоугольной формы), применяемого при изготовлении пластиковых окон в климатических условиях города Геленджика, и для прогнозирования максимальных температур нагрева в климатических условиях города Москвы.

Материалы и методы

В ГЦКИ ВИАМ в течение летнего периода 2021 г. проводили испытания образцов из ПВХ-профиля, применяемого при изготовлении пластиковых окон. Образцы представляли собой часть оконной рамы длиной 500 мм с естественными внутренними

технологическими полостями, перегородками и резиновыми уплотнениями. Образцы окрашены восемью промышленными эмалями разных цветов, которые применяются при производстве оконных пакетов, т. е. образцы являлись частью непосредственно эксплуатируемой конструкции.

Образцы экспонировали на атмосферном стенде на открытой площадке ГЦКИ ВИАМ, расположенном под углом 45 градусов к горизонту и ориентированном на юг (рис. 1). В процессе экспозиции фиксировали метеопараметры атмосферно-испытательного полигона ГЦКИ ВИАМ, а также температуру поверхности экспонируемых образцов путем закрепления на их внутренней стороне датчиков температуры поверхности с помощью термоклей.



Рис. 1. Экспозиция образцов ПВХ-профиля в ГЦКИ ВИАМ

При проектировании подобных конструкций необходимо уделять особое внимание ожидаемым условиям эксплуатации конструкции, так как от этого зависит правильный выбор материалов изделия, в том числе силовых элементов и систем покрытий. Поскольку оконные профили в основном используются на открытом воздухе в естественной атмосфере климатического района, то можно необоснованно предположить, что нагрев конструкции будет сопоставим с температурой окружающей среды.

Основной задачей данной работы являлась оценка максимальной температуры поверхности образцов из ПВХ-профиля и ее моделирование в зависимости от значений воздействующих метеопараметров.

Для моделирования и прогнозирования температуры поверхности образцов использованы подходы, изложенные в работах [2, 15]. Для этого использована мультилинейная зависимость

$$T_s = B_0 + \sum B_{ink} x_{nk}, \quad (1)$$

где T_s – вычисляемая температура поверхности образца; x – воздействующие климатические факторы; B_{ink} – варьируемые параметры модели; B_0 – постоянная.

В качестве моделируемой температуры использовали температуру поверхности самого «горячего» образца в период максимального нагрева образцов, в качестве воздействующих климатических факторов – скорость ветра, относительную влажность и температуру воздуха, плотность потока суммарной солнечной радиации и положение Солнца относительно района экспозиции (углы склонения и высоты Солнца над горизонтом).

Изначально параметры B_{ink} модели (1) подобраны за весь период экспозиции и опробованы на результатах испытаний в день с максимальной температурой поверхности образцов, т. е. день с наибольшей среднесуточной температурой воздуха. На рис. 2 (и далее) приведены фактически измеренные температуры поверхности образца (маркеры) и их смоделированные значения в виде линий.

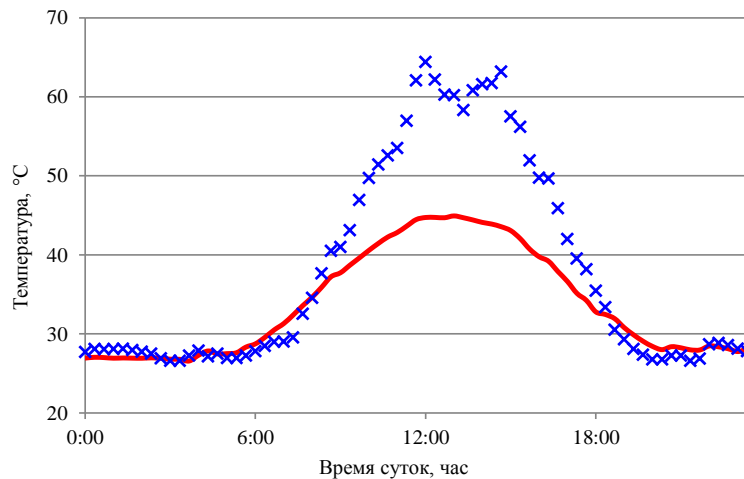


Рис. 2. Смоделированная температура (—) образца в самый жаркий день экспозиции и фактически измеренные значения – маркеры (×)

Модель описывает все экспериментальные данные с достаточно высокой достоверностью (коэффициент детерминации 0,92 при стандартной ошибке 2,5 °С), однако из приведенных на рис. 2 данных видно, что фактическая максимальная температура поверхности образца может быть занижена моделью на ~20 °С.

Недостаточная точность моделирования максимальных температур нагрева поверхности исследуемых образцов может быть связана, в том числе, с их сложной формой – наличие дополнительных ребер жесткости и пустот. На рис. 2 отчетливо наблюдаются два пика значений температуры поверхности образцов. На рис. 3 приведены значения температуры воздуха и солнечной радиации, а также температура поверхности другой крупногабаритной конструкции, экспонируемой на атмосферно-испытательном полигоне ГЦКИ ВИАМ. Однако значительных перепадов в значениях метеопараметров в указанный период времени не наблюдалось. Наличие двух пиков на графике температуры поверхности свидетельствует о более сложных процессах, проходящих при теплообмене образцов сложной формы с окружающей средой. Причем, как следует из полученных данных, максимальная температура поверхности (первый пик) зафиксирована не в момент максимальной температуры воздуха (момент второго пика).

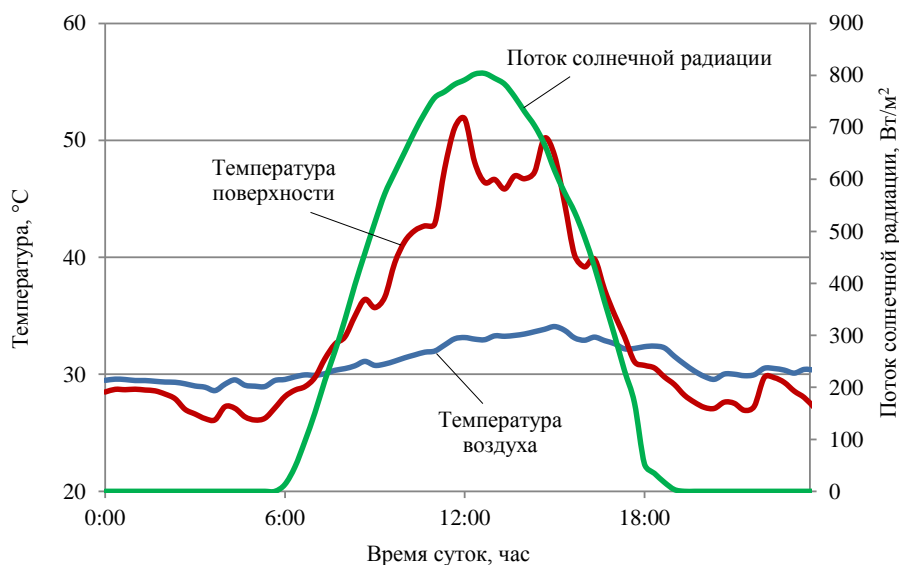


Рис. 3. Температура поверхности крупногабаритной конструкции 29 августа 2021 г.

Для повышения точности прогноза максимальных температур нагрева поверхности в качестве воздействующих климатических факторов в модель (1) добавлены вторая и четвертая степени температуры воздуха, а в качестве экспериментальных данных использованы результаты, полученные в течение 10 сут экспозиции, с максимальной среднесуточной температурой воздуха (720 наблюдений, коэффициент детерминации 0,93 при стандартной ошибке 2,6 °С), а также 10 сут экспозиции с максимальным нагревом поверхности образцов (720 наблюдений, коэффициент детерминации 0,90 при стандартной ошибке 3,9 °С). Результаты исследований приведены на рис. 4.

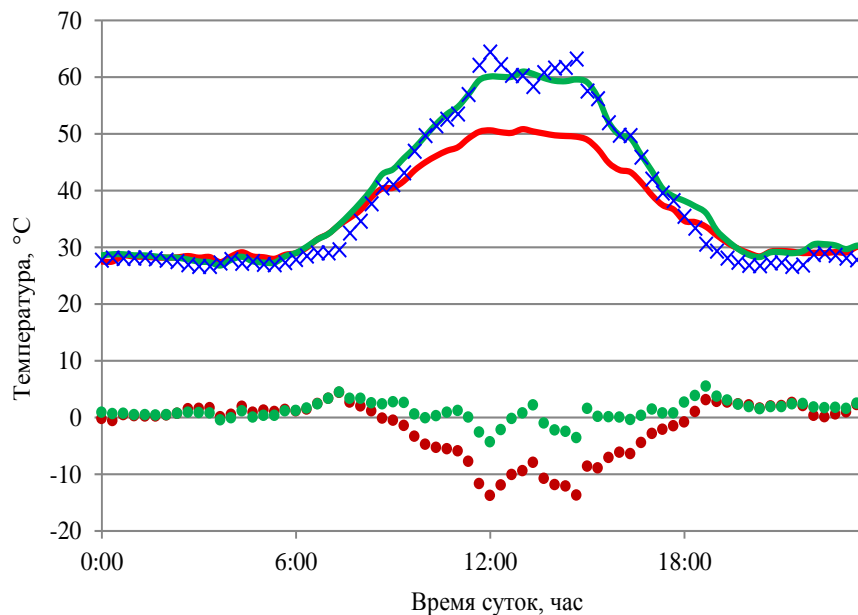


Рис. 4. Сравнение моделей температуры (× — измеренная) поверхности образцов по 10 самым жарким дням (—, • — ошибка) и по 10 дням с максимальным нагревом поверхности образцов (—, • — ошибка)

Результаты и обсуждение

Из данных, представленных на рис. 4, видно, что модель, построенная по данным за 10 дней с максимальным нагревом поверхности образцов, достовернее описывает фактически измеренные значения температуры поверхности в периоды максимальных нагревов поверхности. Например, в день с максимальным нагревом поверхности за весь период экспозиции (29 августа) разница между фактической и смоделированной температурами составила $-4,3$ °С.

Значения фактически измеренных и смоделированных максимальных значений температур поверхности приведены в табл. 1 и 2.

Для оценки максимально возможного нагрева поверхности испытанных образцов в условиях климата Геленджика, использована модель для моделирования нагрева поверхности в период с 2009 по 2019 г. (дни с максимальной температурой воздуха в году). Полученные данные приведены в табл. 3.

Поскольку, с учетом данных табл. 2, смоделированная максимальная температура поверхности образцов может быть занижена моделью на $12,5$ °С, в табл. 3 также указана температура возможного нагрева поверхности.

Таблица 1

**Первые 10 дней с максимальной среднесуточной температурой воздуха
в порядке ее убывания**

Дата	$T_{\text{ср}}$	T_{max}	SR*, МДж	Максимальная температура поверхности, °C		
	°C			по факту	по модели	разница
29.08.2021	31,0	34,0	22,46	64,4	50,8	-13,6
15.07.2021	30,5	33,7	29,12	53,8	51,2	-2,6
17.07.2021	29,8	31,1	27,83	45,8	48,2	+2,4
04.08.2021	29,3	32,7	24,25	58,7	49,3	-9,4
30.08.2021	29,3	34,0	20,68	53,7	50,7	-3,0
05.08.2021	29,2	32,0	25,09	43,2	47,6	+4,4
18.07.2021	29,1	31,2	27,14	48,2	48,0	-0,2
06.08.2021	29,1	32,0	25,97	50,7	49,7	-1,0
14.07.2021	28,9	32,6	26,28	56,8	48,4	-8,4
07.08.2021	28,8	34,1	17,26	47,8	52,2	4,4

*Здесь и далее – энергия солнечной радиации.

Таблица 2

**Первые 10 дней с максимальным нагревом поверхности образцов
в порядке убывания температуры нагрева поверхности**

Дата	$T_{\text{ср}}$	T_{max}	SR, МДж	Максимальная температура поверхности, °C		
	°C			по факту	по модели	разница
29.08.2021	31,0	34,1	22,46	64,4	60,1	-4,3
22.08.2021	25,1	29,6	24,32	63,8	51,3	-12,5
28.08.2021	27,7	32,5	21,35	62,6	51,5	-11,1
24.08.2021	27,7	30,9	23,11	61,1	52,2	-8,9
26.07.2021	27,4	31,2	17,96	58,3	56,3	-2,0
23.08.2021	26,7	29,1	14,90	57,4	48,8	-8,6
14.07.2021	28,9	32,6	26,28	56,8	55,7	-1,1
01.07.2021	26,8	31,4	29,43	55,0	54,1	-0,9
24.07.2021	26,3	30,2	27,49	54,8	50,7	-4,1
09.08.2021	26,1	29,6	14,31	54,8	51,2	-3,6

Таблица 3

**Моделируемые максимальные температуры нагрева поверхности образцов
в ГЦКИ ВИАМ по годам**

Дата	$T_{\text{ср}}$	T_{max}	SR, МДж	Максимальная смоделированная температура поверхности °C	Возможный нагрев поверхности
	°C				
08.08.2010	34,0	38,6	24,96	75,9	88,5
29.07.2011	32,2	36,8	25,48	68,2	80,8
24.07.2012*	33,6	37,6	26,44	76,9	89,4
16.08.2013	30,2	33,6	21,63	54,1	66,7
12.07.2014	28,7	36,4	20,33	64,9	77,5
24.07.2015	30,1	35,0	25,92	59,2	71,8
22.06.2016	30,6	35,3	27,56	62,2	74,8
28.07.2017	30,0	36,6	19,06	69,5	82,1
07.08.2018	30,2	35,2	23,88	60,7	73,3
20.06.2019	30,3	34,4	25,77	56,0	68,6

*День с максимально возможным нагревом поверхности.

Из приведенных многолетних данных и значений смоделированных температур можно предположить, что поверхность исследуемых образцов может нагреться до 76,9–89,4 °С.

На рис. 5 показан смоделированный нагрев поверхности образцов в течение суток 24 июля 2012 г.

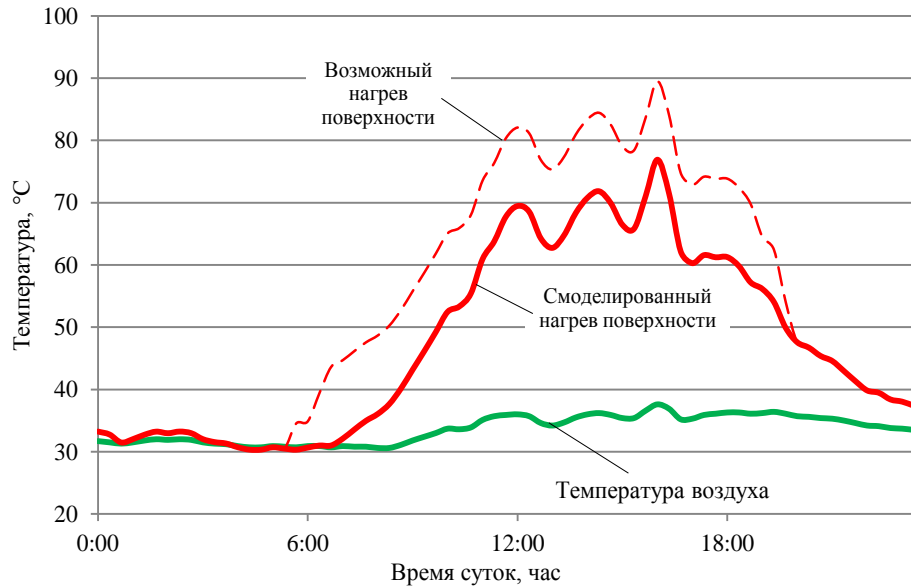


Рис. 5. Смоделированный нагрев поверхности образцов 24 июля 2012 г.

Для оценки возможного максимального нагрева поверхности исследуемых образцов в районе с другими климатическими условиями, смоделирована температура нагрева поверхности 23 июня 2021 г. в условиях промышленной атмосферы города Москвы (табл. 4, рис. 6). Значения метеопараметров получены на метеостанции МЦКИ ВИАМ.

Таблица 4

Моделируемая максимальная температура нагрева поверхности образцов в климатических условиях города Москвы

Дата	$T_{\text{ср}}$	T_{max}	SR, МДж	Максимальная смоделированная температура поверхности	Возможный нагрев поверхности
	°С				
23.06.2021	31,9	37	32	72,8	85,3

Следует отметить, что при эксплуатации конечных изделий (оконных рам), выполненных из полимерных материалов и окрашенных исследуемыми лакокрасочными покрытиями, в условиях города Москвы температура их поверхности может достигать 72,8–85,3 °С.

Таким образом, производители достаточно широко применяемых оконных профилей должны учитывать при выборе материалов конструкции, что она может испытывать при эксплуатации воздействие температурных режимов, значительно превышающих среднегодовые и экстремальные температурные показатели климатического района.

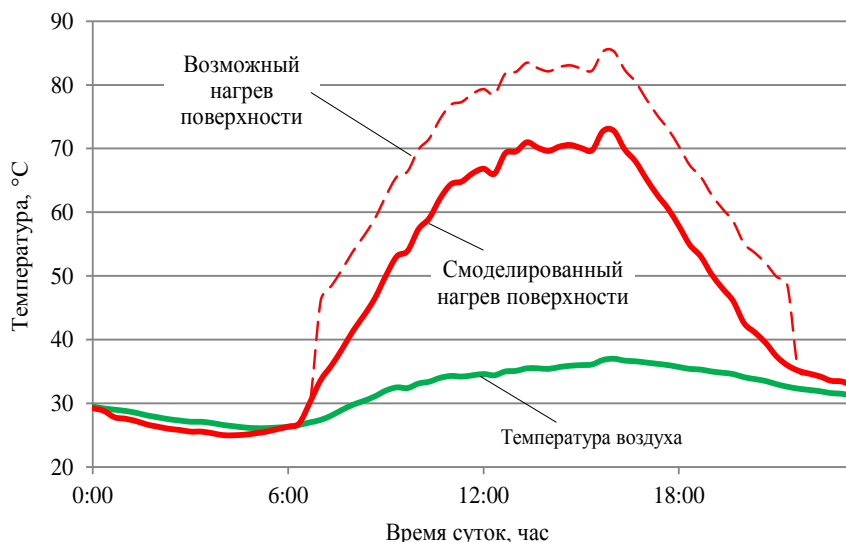


Рис. 6. Смоделированный нагрев поверхности образцов 23 июня 2021 г. в условиях города Москвы

Заключения

Построена линейная модель зависимости температуры нагрева поверхности образцов из ПВХ-профиля, применяемого для изготовления пластиковых окон, от значений воздействующих метеопараметров – скорости ветра, относительной влажности и температуры (вторая и четвертая степени) воздуха, плотности потока суммарной солнечной радиации и положения Солнца (углы склонения и высоты над горизонтом).

Установлено, что модель, построенная по результатам всего периода экспозиции (летний период 2021 г.), описывает максимальные температуры нагрева поверхности с ошибкой до -20°C .

Недостаточная точность моделирования максимальных температур нагрева поверхности исследуемых образцов может быть связана, в том числе, с их сложной формой – наличие дополнительных ребер жесткости и пустот. По результатам исследований наблюдаются два пика в значениях температуры поверхности образцов, однако значительных перепадов в значениях метеопараметров в указанный период времени не наблюдается. Наличие пиков на графике температуры поверхности свидетельствует о более сложных процессах, проходящих при теплообмене образцов сложной формы с окружающей средой. Причем, как следует из полученных данных, максимальная температура поверхности (первый пик) зафиксирована не в момент максимальной температуры воздуха (второго пика).

Для повышения точности моделирования использована модель, построенная по первым 10 дням с максимальным нагревом поверхности образцов, которая описывает фактически измеренные данные с ошибкой до $-12,5^{\circ}\text{C}$. Следует отметить, что ошибка модели в день с максимальным нагревом поверхности за весь период испытаний составила $-4,3^{\circ}\text{C}$.

Спрогнозирован максимальный нагрев поверхности образцов за 10 лет метеонаблюдений, который составил от $76,9^{\circ}\text{C}$ (смоделированный) до $89,4^{\circ}\text{C}$ (возможный). Использование модели для моделирования максимального нагрева поверхности испытываемых образцов в промышленной атмосфере города Москвы позволило спрогнозировать нагрев поверхности в пределах $72,8\text{--}85,3^{\circ}\text{C}$.

Следует отметить, что в настоящее время получить модель, достаточно достоверно описывающую периоды максимального нагрева поверхности с использованием значений воздействующих метеопараметров, не удалось. Однако полученные данные позволяют судить об условиях эксплуатации конечных изделий в различных климатических регионах в зависимости от наблюдаемых экстремальных показаний их метеопараметров.

Список источников

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
3. Старцев О.В., Медведев И.М., Курс М.Г. Твердость как индикатор коррозии алюминиевых сплавов в морских условиях // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 3 (24). С. 16–19.
4. Абрамова М.Г., Луценко А.Н., Варченко Е.А. Об особенностях подтверждения соответствия климатической стойкости материалов авиационного назначения на всех этапах жизненного цикла (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
5. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. № 11. С. 19–26.
6. 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*. 2016. № 10 (46). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-96-105.
7. Guedes Soares C., 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.
8. Grossman P.R. Investigation of atmospheric exposure factors that determine time of wetness of outdoor structures. ASTM International, 1978. P. 5–16.
9. Gardiner C.P., Melchers R.E. Enclosed atmospheric corrosion in ship spaces // *British Corrosion Journal*. 2003. Vol. 6. No. 4. P. 272–276.
10. Al-Rawahi N.Z., Zurigat Y.H., Al-Azri N.A. 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.
11. Bijl P. Modelling of sample surface temperature in an outdoor weathering test // *Polymer Testing*. 2011. Vol. 30. No. 5. P. 485–492.
12. Burch D.M., Martin J.W. Predicting the Temperature and Relative Humidity of Polymer Coatings in the Field // *Service Life Prediction of Organic Coatings ACS Symposium Series*. American Chemical Society, 1999. P. 85–107.
13. Burch D., Martin J., Van Landingham M. Computer analysis of a polymer coating exposed to field weather conditions // *Journal of Coatings Technology*. 2002. Vol. 74. No. 924. P. 75–86.
14. Pickett J.E., Sargent J.R. Sample temperatures during outdoor and laboratory weathering exposures // *Polymer Degradation and Stability*. 2009. Vol. 94. No. 2. P. 189–195.
15. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.

References

1. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
2. Kablov E.N., Startsev V.O., Inozemtsev A.A. The moisture absorption of structurally similar samples from polymer composite materials in open climatic conditions with application of thermal spikes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
3. Startsev O.V., Medvedev I.M., Kurs M.G. Hardness as the indicator of corrosion of aluminum alloys in sea conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 3, pp. 16–19.
4. Abramova M.G., Lutsenko A.N., Varchenko E.A. Concerning the aspects of validation of climate resistance of airborne materials at all life cycle stages (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
5. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of aviation composite materials. I. Mechanisms of aging. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2010, no. 11, pp. 19–26.
6. Startsev V.O., Medvedev I.M., Startsev O.V. Prognostication of surface temperature of epoxy coatings on aluminum alloy subjected to long exposure in natural climate conditions. *Trudy VIAM*, 2016, no. 10, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 26, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-12-12.
7. Guedes Soares C., 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, pp. 2014–2026.
8. Grossman P.R. Investigation of atmospheric exposure factors that determine time of wetness of outdoor structures. ASTM International, 1978, pp. 5–16.
9. Gardiner C.P., Melchers R.E. Enclosed atmospheric corrosion in ship spaces. *British Corrosion Journal*, 2003, vol. 6, no. 4, pp. 272–276.
10. Al-Rawahi N.Z., Zurigat Y.H., Al-Azri N.A. Prediction of hourly solar radiation on horizontal and inclined surfaces for Muscat/Oman. *The Journal of Engineering Research*, 2011, vol. 8, no. 2, pp. 19–31.
11. Bijl P. Modelling of sample surface temperature in an outdoor weathering test. *Polymer Testing*, 2011, vol. 30, no. 5, pp. 485–492.
12. Burch D.M., Martin J.W. Predicting the Temperature and Relative Humidity of Polymer Coatings in the Field. *Service Life Prediction of Organic Coatings ACS Symposium Series*. American Chemical Society, 1999, pp. 85–107.
13. Burch D., Martin J., Van Landingham M. Computer analysis of a polymer coating exposed to field weather conditions. *Journal of Coatings Technology*, 2002, vol. 74, no. 924, pp. 75–86.
14. Pickett J.E., Sargent J.R. Sample temperatures during outdoor and laboratory weathering exposures. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, vol. 94, no. 2, pp. 189–195.
15. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2020-0-4-47-58.

Информация об авторах

Панин Сергей Викторович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergei V. Panin, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.12.2021.

The article was submitted 06.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 08.12.2021.