

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ СРОКАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ И ДИАГНОСТИКА ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ ТЕМПОВ НАГРЕВА

© 2024 г. В.Г. Дегтярь^{1,*}, В.В. Гусев¹, С.Т. Калашников^{2,**}, Г.Ф. Костин², А.И. Новиков^{1,3,***}, В.И. Хлыбов^{1,2}

¹ АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»,
Россия 456300 Миасс, Тургорское шоссе, 1

² Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Россия 456317 Миасс, Ильменский заповедник

³ Филиал в г. Миассе ГОАУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), Россия
456318 Миасс, пр-т Октября, 16

E-mail: *src@makeyev.ru; **finigz@mineralogy.ru; ***info@miass.susu.ru

Поступила в редакцию 07.06.2024; после доработки 13.06.2024

Принята к публикации 14.06.2024

Комплекс работ по диагностике изменения характеристик материалов вследствие старения включает в себя ускоренные климатические испытания (УКИ) и испытания по определению характеристик до и после УКИ. Наряду с применением различных методов диагностики дефектов, возникающих и развивающихся в процессе старения, важны также вопросы определения связанных с процессами изменений структуры материала изменений теплофизических, влагофизических и других характеристик материалов, прошедших длительные сроки эксплуатации. В работе, наряду с методом синхронного расчета изменения теплофизических и влагофизических свойств материалов вследствие старения и соответствующих поправок к изменению тепловлажностных режимов изделий при длительных сроках эксплуатации и хранения, представлены также экспериментальная установка и метод экспериментально-аналитического определения теплофизических характеристик материалов при переменных темпах нагрева по результатам тепловых испытаний образцов, прошедших и не прошедших УКИ, с использованием при анализе результатов испытаний аппроксимационно-суперпозиционного метода для решения обратной задачи теплопроводности.

Ключевые слова: старение материалов, диагностика изменения свойств материалов, теплофизические характеристики, влагофизические характеристики, тепловые испытания, обратные задачи теплопроводности.

CHANGES IN THE MATERIAL PROPERTIES AND HEAT AND HUMIDITY CONDITIONS FOR LONG-TERM OPERATION OF PRODUCTS AND DIAGNOSTICS OF THE DEPENDENCE OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES ON HEATING RATES

© 2024 V.G. Degtiar^{1,*}, V.V. Gusev¹, S.T. Kalashnikov^{2,**}, G.F. Kostin², A.I. Novikov^{1,3,***}, V.I. Khlybov^{1,2}

¹ Joint Stock Company "Academician V. P. Makeyev State Rocket Centre",
Russia 456300 Miass, Turgoyakskoye shosse, 1

² South Ural Federal Research Centre of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of RAS,
Russia, 456317 Miass, Ilmensky zapovednik

³ Miass Branch of State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University"
(National Research University), Russia, 456318, Miass, pr. Oktyabrya, 16

E-mail: *src@makeyev.ru; **finigz@mineralogy.ru; ***info@miass.susu.ru

The complex of works on the diagnostics of changes in the material properties due to aging includes accelerated climatic tests (ACT) and performance tests before and after ACT. Along with the use of various methods for diagnosing defects that arise and develop during aging, it is also important to determine the changes in the thermophysical, moisture-physical and other properties of materials that have passed long-term operation associated with the processes of changes in the material structure. In addition to the method of synchronous analysis of changes in the thermophysical and moisture-physical properties of materials due to aging and corresponding corrections to changes in the heat and humidity conditions of products during long periods of operation and storage, an experimental facility and a method for experimental and analytical determination of the thermophysical properties of materials at variable heating rates based on the results of thermal tests of samples that have passed and have not passed ACT, using the approximation-superposition method in the analysis of test results to solve the inverse problem of thermal conductivity.

Keywords: aging of materials, diagnostics of changes in the properties of materials, thermophysical properties, moisture-physical properties, thermal testing, inverse problems of heat conductivity.

DOI: 10.31857/S0130308224060059

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время накоплен достаточно обширный фактический материал по изменениям теплофизических (ТФХ) и влагофизических (ВФХ) и других характеристик материалов, прошедших длительные сроки эксплуатации в составе элементов конструкций изделий, или измеренных на образцах, прошедших ускоренные климатические испытания. Пример таких изменений представлен в табл. 1. Это происходит вследствие изменения структурных параметров материалов в процессе старения, в том числе накапливаются и развиваются внутренние дефекты типа микротрещин. Вопросы же диагностики дефектов, вероятность обнаружения дефектов зависят от их типа, размера, формы и ориентации в объектах контроля [1]. В частности, при эксплуатации объектов из углепластиков, подвергаемых не только механическим, но и тепловлажностным нагрузкам, возникает опасность их внезапного разрушения. Этому предшествуют накопления повреждений на уровне структуры материала, которые могут быть вызваны как технологическими причинами (низкая степень отверждения полимерной матрицы, разрыв упрочняющих волокон), так и различными внешними воздействиями [2]. Наряду с применением различных методов диагностики дефектов, возникающих и развивающихся в процессе старения, важны также вопросы определения связанных с процессами изменений на уровне структуры материала изменений теплофизических, влагофизических и других характеристик материалов, прошедших длительные сроки эксплуатации. Изменения характеристик, в том числе и развитие дефектов, зависят от тепловых и влажностных режимов, реализующихся при длительных сроках хранения и эксплуатации материалов в составе изделий, и важным является вопрос прогнозирования этих изменений в зависимости от условий хранения и эксплуатации. В связи с этим в настоящей работе, наряду с методом синхронного расчета изменения теплофизических и влагофизических свойств материалов вследствие старения и соответствующих поправок к изменению тепловлажностных режимов изделий при длительных сроках эксплуатации и хранения, представлены также экспериментальная установка и метод экспериментально-аналитического определения теплофизических характеристик материалов при переменных темпах нагрева по результатам тепловых испытаний образцов, прошедших и не прошедших УКИ.

1. МЕТОД РАСЧЕТНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В представленной табл. 1 приведены примеры фактических данных по изменению теплофизических характеристик некоторых материалов после длительных сроков эксплуатации и УКИ. Эти данные были обобщены авторами в ходе работ по дефектации изделий и образцов после длительных сроков эксплуатации и УКИ. Видно, что свойства могут меняться на 10—35 %, вследствие чего фактические значения температуры элементов конструкций и при хранении, и при нагреве в условиях штатного применения могут превышать расчетные.

Материалы типа ТТП-ФС, ТТП-Т — это тонкослойные теплозащитные покрытия на основе хлорсульфированного полиэтилена с различными мелкодисперсными наполнителями, в частности в виде фенольных микросфер. ПКТ-Д — это кварцетекстолитовое теплозащитное покрытие на основе наполнителя из кварцевой ткани с фенолформальдегидным связующим, отверждаемое под давлением. Изменения свойств материалов могут быть значимыми, как это видно из табл. 1, но вместе с тем являются относительно малыми по отношению к исходным, неизменным значениям. Это обусловлено в том числе требованиями по обеспечению активной работоспособности изделий, например, выполнения ракетой полетного задания в течение всего гарантийного срока. Естественно, что вопросы старения материалов, разработки и совершенствования методов испытаний на старение (натурных и УКИ), методов обработки и анализа результатов испытаний являются актуальными [3—13 и др.]. Обзор указанных и других работ показал, что метод синхронного расчета тепловлажностных режимов и изменения теплофизических и влагофизических свойств материалов вследствие старения, основы которого были разработаны в 2015 году [14], пока не используется. Вместе с тем, этот метод может применяться и при анализе УКИ с целью определения кинетических параметров изменения свойств в процессе старения. Кратко суть метода представлена ниже. Обозначая исходные, не измененные значения ТФХ нижним индексом «н», а дополнительные изменения вследствие старения — волной сверху, зависимость для изменения свойств материалов при эксплуатации и хранении можно представить в виде:

$$\eta = \eta_n + \tilde{\eta} \left(\theta, T, \int_0^{\tau} k_n e^{\frac{E_n}{RT}} d\tau \right), \quad (1)$$

Пример изменения теплофизических характеристик некоторых материалов вследствие старения

Материал	Плотность ρ , г/см ³		Коэффициент теплопроводности λ , Вт/мК		Удельная теплоемкость c_p , кДж/кгК		Срок эксплуатации ^{*)} , годы
	Значения до УКИ или срока службы	Значения после УКИ или срока службы	Значения до УКИ или срока службы	Значения после УКИ или срока службы	Значения до УКИ или срока службы	Значения после УКИ или срока службы	
ТТП-ФС	$\frac{0,28-0,36}{0,32}^{**})$	$\frac{0,34-0,37}{0,36}$	$\frac{0,046-0,07}{0,058}$	$\frac{0,060-0,100}{0,078}$	$\frac{1,55-1,85}{1,70}$	$\frac{1,80-2,10}{1,93}$	15—23 (6 изделий)
	До УКИ 0,36	После УКИ 0,37	До УКИ 0,066	После УКИ 0,068	До УКИ 1,97	После УКИ 1,99	18 ^{*)}
	До УКИ 0,36	После УКИ 0,42	До УКИ 0,067	После УКИ 0,076	До УКИ 1,94	После УКИ 1,98	18 ^{*)}
Асботекстолит АТ-342	$\frac{1,20-1,60}{1,40}^{**})$	$\frac{1,40-1,57}{1,49}$	$\frac{0,35-0,67}{0,51}$	$\frac{0,54-0,61}{0,56}$	$\frac{0,96-1,29}{1,125}$	$\frac{1,01-1,11}{1,066}$	20—24 (7 изделий)
ПКТ-Д	$\frac{1,53-1,73}{1,63}^{**})$	$\frac{1,60-1,64}{1,62}$	$\frac{0,30-0,46}{0,38}$	$\frac{0,410-0,465}{0,436}$	$\frac{0,75-1,01}{0,88}$	$\frac{0,79-0,95}{0,87}$	10,5—15,5 (8 изделий)
ТТП-Г	$\frac{1,25-1,77}{1,51}^{**})$	—	$\frac{0,11-0,23}{0,17}^{**})$	После УКИ 0,164	$\frac{0,81-0,95}{0,88}^{**})$	После УКИ 1,00	18 ^{*)}
			До УКИ 0,164	После УКИ 0,155	До УКИ 1,00	После УКИ 1,35	21 ^{*)}

^{*)} для УКИ — моделируемый срок эксплуатации; ^{**) —} данные по ТУ на материал.

где η — индекс свойства материала; E_η — энергия активации процессов изменения η -го свойства при старении; k_η — предэкспонентные множители в уравнении Аррениуса; R — газовая постоянная; θ — потенциал влажности; T — температура; τ — время.

В частности, для коэффициента теплопроводности λ зависимость (1) принимает вид:

$$\lambda = \lambda_n + \tilde{\lambda} \left(\theta, T, \int_0^\tau \left(k_\lambda e^{-\frac{E_\lambda}{RT}} \right) d\tau \right). \quad (2)$$

Значения зависимостей с волной можно принимать как малые первого порядка по сравнению со значениями с нижним индексом «н».

Уравнения теплопроводности и влагопроводности являются подобными. Уравнение теплопроводности:

$$(c_p \rho) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_v, \quad (3)$$

где c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; q_v — тепловыделение (теплопоглощение, источник, сток); ρ — плотность материала.

Уравнение влагопроводности:

$$(c\rho) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \operatorname{div}(c\rho D \operatorname{grad} \theta) + m_v, \quad (4)$$

где θ — потенциал влагопереноса; $\lambda_v = (c\rho)D$ — коэффициент влагопроводности материала; $c = \partial u / \partial \theta$ — влагоемкость материала; $u(\theta, T)$ — равновесное влагосодержание материала; $D(\theta, T)$ — коэффициент диффузии влаги в материале; m_v — влаговыделение (влагопоглощение, источник, сток).

Подставляя зависимости вида (1), (2) в уравнение (3), после отбрасывания малых второго порядка, с учетом тождественного удовлетворения уравнения (3) при номинальных значениях, получим:

$$c_{pn} \rho_n \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_n \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_n \frac{\partial \tilde{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_n \frac{\partial \tilde{T}}{\partial z} \right) + \tilde{q}_v, \quad (5)$$

где $\tilde{q}_V$ — источниковый член за счет поглощения (выделения) энергии при процессах, вызывающих отклонения значений свойств от номинального (исходного) значения:

$$\tilde{q}_V = -\left(c_{pH}\tilde{\rho} + \tilde{c}_p\rho_H\right)\frac{\partial T_H}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\tilde{\lambda}\frac{\partial T_H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\tilde{\lambda}\frac{\partial T_H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\tilde{\lambda}\frac{\partial T_H}{\partial z}\right). \quad (6)$$

Уравнение (5) и исходное уравнение (3) по виду совпадают. Если зависимости вида (1), (2) известны, то с использованием решения $T_H = T_H(x, y, z, \tau)$, полученного при номинальных значениях c_{pH} , ρ_H , λ_H , q_{VH} , можно найти значения величин изменения характеристик в процессе старения, а с использованием этих значений определить добавочный источниковый член $\tilde{q}_V$ за счет поглощения (выделения) энергии при процессах старения. Затем из решения уравнения (5) при нулевых граничных и начальных условиях находятся значения функции $T(x, y, z, \tau)$ отклонения поля температуры за счет изменения свойств материалов в процессе старения. При необходимости можно принять полученные значения $T_H(x, y, z, \tau) + \tilde{T}(x, y, z, \tau)$

и $\eta_H + \tilde{\eta}\left(\theta, T, \int_0^\tau \left(k_\eta e^{-\frac{E_\eta}{RT}}\right) d\tau\right)$ за номинальные и провести расчет второго приближения и так далее.

Аналогично и для уравнения влагопроводности. После подстановки зависимостей вида (1), (2) в уравнение (4) и отбрасывания малых второго и большего порядков малости, с учетом тождественного выполнения при номинальных значениях уравнения (4), получим уравнение:

$$(c_H\rho_H)\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(c_H\rho_H D_H \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c_H\rho_H D_H \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(c_H\rho_H D_H \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z}\right) + \tilde{m}_V, \quad (7)$$

где с точностью до малых второго и более высокого порядков:

$$\begin{aligned} \tilde{m}_V = & \frac{\partial}{\partial x}\left(c_H\tilde{\rho}D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\tilde{c}_p\rho_H D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(c_H\rho_H\tilde{D} \frac{\partial \theta_H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c_H\tilde{\rho}D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial y}\right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y}\left(\tilde{c}_p\rho_H D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c_H\rho_H\tilde{D} \frac{\partial \theta_H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(c_H\tilde{\rho}D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\tilde{c}_p\rho_H D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial z}\right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z}\left(c_H\rho_H\tilde{D} \frac{\partial \theta_H}{\partial z}\right) - c_H\tilde{\rho} \frac{\partial \theta_H}{\partial \tau} - \tilde{c}_p\rho_H \frac{\partial \theta_H}{\partial \tau}. \end{aligned}$$

Решая уравнение (7) при нулевых граничных и начальных условиях, получим решение для дополнительного изменения потенциала влагопереноса с учетом изменения свойств материалов в процессе старения. Аналогично можно сделать расчет второго и последующих приближений.

После УКИ различными методами, применяемыми для определения физических параметров и характеристик материалов, находят реализовавшиеся значения параметров и характеристик и их отличия от значений до УКИ. С использованием величин этих изменений и зависимостей вида (1), (2) можно по реализованным при УКИ значениям температуры и влажности определить значения k_η и E_η , в том числе для развития дефектов типа микро- и макротрещин, коррозионных дефектов.

2. ДИАГНОСТИКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для проведения УКИ в АО «ГРЦ Макеева» имеется обширная экспериментальная база, на которой проводятся УКИ материалов и экспериментальная отработка систем и элементов конструкций изделий на долговечность. После УКИ проводятся испытания по определению характеристик материалов на образцах, прошедших УКИ, и на образцах-свидетелях, не прошедших УКИ. Используемые в уравнении (3) ТФХ зависят от температуры и темпов нагрева, особенно при прогреве и разложении композиционных материалов. В связи с этим одним из важных видов испытаний являются тепловые испытания по определению изменения зависимостей ТФХ материалов от температуры и темпов нагрева в процессе старения. Так как композиционные теплозащитные материалы в последние двадцать лет находят все более широкое применение в ракетной и космической технике, в частности в разработках АО «ГРЦ Макеева»

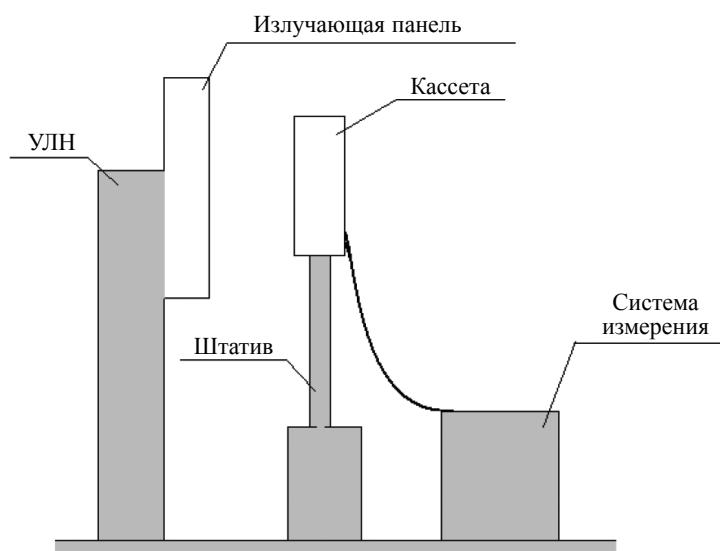


Рис. 1. Схема установки лучистого нагрева.

[15], то особенно актуальными являются задачи прогнозирования и определения эффективных ТФХ материалов, разлагающихся в процессе прогрева. Для определения теплоемкости и кинетических параметров разложения таких материалов применяют термогравиметрический метод, как это было сделано в работе [16], в которой представлены результаты испытаний и синхронного термического анализа образцов углепластикового материала с использованием прибора STA Netzsch STA 449 Jupiter и дериватографа Q-1000. Имеющиеся методы теоретического прогнозирования характеристик композиционных материалов в процессе нагрева, в частности углепластиковых материалов, требуют использования данных по ТФХ компонент, входящих в материал [17, 18], которые, как правило, также определяются экспериментально. Для определения и подтверждения ТФХ материалов при различных темпах и уровнях нагрева в АО «ГРЦ Макеева» используется установка лучистого нагрева (УЛН), оснащенная нагревателями в виде плоских панелей-отражателей с закрепленными на них параллельно панели лампами инфракрасного излучения. Схема установки приведена на рис. 1. Установка имеет систему крепления нагреваемых образцов (деталей) и систему измерений и регистрации тепловых параметров. При испытаниях крупных деталей могут использоваться несколько нагревательных панелей, при испытаниях образцов — одна, которая направляется на кассету крепления образцов. В кассете одновременно могут испытываться несколько образцов, в том числе подвергнутые УКИ на различные сроки старения, и образцы-свидетели (рис. 2). Нагревательные панели подключены к электросети через тиристорные регуляторы мощности. Мощность, подаваемая на нагревательные панели, может задаваться в пределах от 10 до 100 кВт.

Установка оснащена системой обеспечения режима переменного нагрева путем изменения электрической мощности нагрева через тиристорный регулятор мощности по заданной программе. Система обеспечивает максимальный темп роста мощности от 0 до 100 % за время не более 1 с и любые меньшие темпы нагрева, требуемые по программе испытаний. Установка позволяет облучать образцы материалов и пакетов теплозащитных покрытий (ТЗП) тепловым потоком до 350 кВт/м² и обеспечивать нагрев поверхности образцов до 1000 °С за время, близкое к условиям применения на изделиях: от «крутых» до «пологих» темпов нагрева. Пакеты ТЗП и, соответственно, образцы могут быть многослойными. Образцы имеют размеры 50×50×*h* мм, где *h* — суммарная толщина пакета ТЗП. Порядок отношения $o(h/50) \approx 0,1$, поэтому в средней зоне образца реализуются тепловые режимы, близкие к режимам для неограниченной пластины. Схема варианта двухслойного образца приведена на рис. 3. Пакет ТЗП приклеивается к металлической подложке, сверху к пакету ТЗП плотно прижимается тонкая стальная пластина (крышка), которая экранирует образец от возможного проникновения излучения вглубь ТЗП. В крышку, между крышкой и ТЗП, между слоями ТЗП, между ТЗП и подложкой, в подложку устанавливаются термодатчики и термометры сопротивления с парным дублированием. Показания термодатчиков, установленных между крышкой и ТЗП, являются граничными условиями первого рода для прямой задачи теплопроводности. Подложка опирается на теплоизолятор, поэтому на границе подложки и теплоизолятора принимается условие адиабатичности, а металлическая подложка математически является слоем с бесконечной теплопроводностью на границе пакета ТЗП.

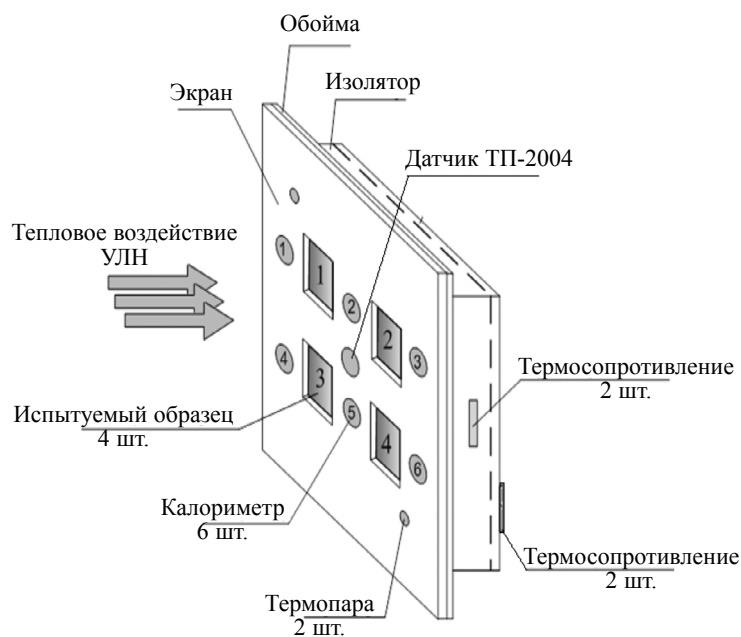


Рис. 2 . Схема кассеты с образцами.

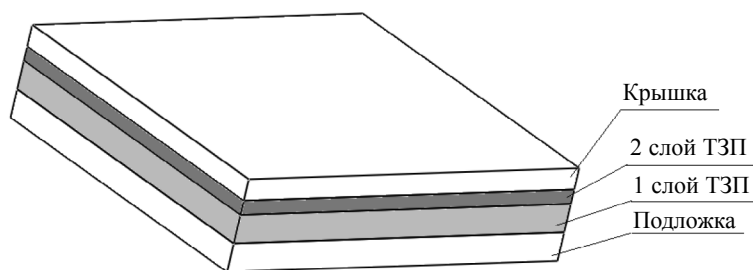


Рис. 3. Схема двухслойного образца.

Для диагностики изменения теплофизических характеристик материалов вследствие старения при их длительной эксплуатации в составе изделий в кассету вставляются одновременно состаренные образцы и образцы-свидетели, не прошедшие ускоренных испытаний. Могут испытываться образцы, изготовленные из ТЗП изделий, прошедших длительную эксплуатацию, при их дефектации. Достоверность данных по испытаниям и обеспечение задаваемых режимов испытаний подтверждаются контрольными измерениями. Образцы, калориметры и датчики теплового потока вставлены в теплоизолятор. Изолятор со всех сторон облицован стальными элементами: экран, обойма, подложка изолятора. Калориметры равномерно распределены по поверхности кассеты для подтверждения равномерности потока. Неравномерность не превышает погрешности средств измерения.

Значения ТФХ при нормальной температуре определяются стандартными методами, а для определения зависимостей ТФХ от температуры и темпов нагрева могут применяться различные методы. Обработка результатов измерений может проводиться на основе методов решения обратных задач теплопроводности [19, 20], которые в случае переменных темпов нагрева и переменных ТФХ являются достаточно сложными. При нелинейных темпах нагрева может использоваться также аппроксимационно-суперпозиционный метод решения задач теплопроводности [21—24]. Суть метода применительно к анализу результатов испытаний плоских образцов на установках типа УЛН представлена в работах [23, 24].

В случае неограниченной пластины уравнение теплопроводности при отсутствии внутренних тепловых источников и постоянном значении коэффициента температуропроводности имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (8)$$

где T , τ , x , a — соответственно температура, время, поперечная координата с началом на поверхности и коэффициент теплопроводности.

При аппроксимации условий однозначности сложных задач теплопроводности известными простыми функциями, для которых имеются аналитические решения, можно выписать приближенное аналитическое решение для исходной сложной задачи [21—24]. В частности, сложные граничные условия (ГУ) могут быть аппроксимированы с допустимой погрешностью ступенчатой или ломаной линией. При анализе испытаний плоских образцов на УЛН задача сводится к сумме двух задач теплопроводности для неограниченной пластины с ГУ I-го рода на одной поверхности и ГУ II-го рода на другой поверхности. Первая задача — неограниченная пластина с измеренными в эксперименте ГУ I рода на поверхности, примыкающей к крышке, с нулевым тепловым потоком на поверхности, примыкающей к подложке, с начальной температурой по толщине ТЗП $T|_{\tau=0} = T_0$, вторая — неограниченная пластина с нулевым значением температуры $T_{00} = 0$ К на поверхности, примыкающей к крышке, нулевым начальным значением и с ГУ II рода на поверхности, примыкающей к подложке, рассчитанными по измеренным значениям температуры подложки:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h} = S(\tau) = S_{\text{ин}} + S_{\text{п}} - S_{\text{ап}} = -\varepsilon_{\text{п}} \sigma_0 (T_{\text{п}}^4 - T_{\text{с}}^4) - c'_p \rho' h' \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial \tau} - S_{\text{ап}}, \quad (9)$$

где c'_p , ρ' , h' — соответственно теплоемкость, плотность, толщина слоя бесконечной теплопроводности (металлической подложки); $T_{\text{п}}$, $T_{\text{с}}$ — измеренная температура подложки и температура стенок испытательного помещения (принималась равной начальной температуре); $\varepsilon_{\text{п}}$ — степень черноты подложки; σ_0 — постоянная Стефана—Больцмана; $S_{\text{ин}}$, $S_{\text{п}}$, $S_{\text{ап}}$ — соответственно теплоотвод излучением в подложку и в помещение за счет конвективного теплообмена. При закрытии подложки теплоизолятором (основная схема сборки) первым и третьим слагаемыми в правой части в (9) можно пренебрегать.

Если на поверхности $x = 0$ задано сложное ГУ I рода в виде кривой $T|_{x=0} = f(\tau)$, то кривая может быть аппроксимирована ломаной линией с N отрезками, при этом значения температуры поверхности T_i в моменты τ_i , $i = 0, 1, \dots, N$ равны $T_i = T|_{x=0, \tau=\tau_i} = f(\tau_i)$. Соответственно, решением уравнения (10) для первой задачи является сумма решений простых задач с линейным изменением ГУ, в одной из которых берется начальное условие (НУ) исходной задачи, а в других НУ равны нулю [21—24]:

$$T = T_0 + \frac{h^2}{a} \sum_{i=1}^N \frac{[1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})]}{2} \cdot [\theta_i \cdot (b_i - b_{i-1})]; \quad (10)$$

$$\theta_i = F_{0i} - \eta + \frac{\eta^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cdot \cos[\mu_n (1 - \eta)] \cdot \exp(-\mu_n^2 F_{0i}); \quad (11)$$

$$b_i = \frac{T_i - T_{i-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}}; \quad F_{0i} = \frac{a(\tau - \tau_{i-1})}{h^2}; \quad \eta = \frac{x}{h}, \quad b_0 = \tau_0 = 0. \quad (12)$$

При аппроксимации переменного ГУ $S = S(\tau)$ второй задачи ступенчатой линией с N интервалами, на каждом из которых реализуется значение $S_i = \text{const}$, равное, например, среднеинтегральному значению S на этом интервале, решение имеет вид:

$$T = T_{00} + \frac{h}{\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{[1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})]}{2} \cdot [\theta_{ii} \cdot (S_i - S_{i-1})]; \quad (13)$$

$$\theta_{ii} = 1 - \eta_i - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin[\mu_n (1 - \eta_i)] \cdot \exp(-\mu_n^2 F_{0i}) = \eta - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(\mu_n \eta) \cdot \exp(-\mu_n^2 F_{0i}), \quad (14)$$

$$F_{0i} = \frac{a(\tau - \tau_{i-1})}{h^2}, \quad S_0 = \tau_0 = T_{00} = 0.$$

Общее решение задачи (8) есть сумма решений (10) и (13):

$$T = T_0 + \frac{h^2}{a} \sum_{i=1}^N \frac{[1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})]}{2} \cdot [\theta_i \cdot (b_i - b_{i-1})] + \frac{h}{\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{[1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})]}{2} \cdot [\theta_{li} \cdot (S_i - S_{i-1})], \quad (15)$$

где входящие в решение параметры рассчитываются по формулам (11), (12), (14).

Если интервалы аппроксимации таковы, что $Fo_{i+1} = \frac{a(\tau_i - \tau_{i-1})}{h^2} \geq 0,9$, то из графиков работы [22] следует, что суммами рядов в (13) и (16) с погрешностью 15 % в моменты времени τ_i , $i = 1, 2, \dots, N$ можно пренебречь. При таких и еще больших значениях чисел Фурье решение (15) для любого узлового момента времени τ_k , $k = 1, 2, \dots, N$ принимает вид:

$$\begin{aligned} T|_{\tau=\tau_k} &= T_0 + \frac{h^2}{a} \sum_{i=1}^k \left(\frac{a(\tau_k - \tau_{i-1})}{h^2} - \eta + \frac{\eta^2}{2} \right) \cdot (b_i - b_{i-1}) + \frac{h\eta}{\lambda} \sum_{i=1}^k (S_i - S_{i-1}) = \\ &= T_0 + \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) - \frac{h^2}{a} \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right) \cdot (b_k - b_0) + \frac{h\eta(S_k - S_0)}{\lambda} = \\ &= T_{kk} - \frac{h^2}{a} \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right) \cdot (b_k - b_0) + \frac{h\eta(S_k - S_0)}{\lambda}, \end{aligned} \quad (16)$$

где T_{kk} — температура поверхности слоя ТЗП в момент τ_k .

Как правило, ТФХ материалов при температурах 15 — 25 °С известны, а в интересах практики необходимо определять ТФХ в диапазоне температур эксплуатации материалов, которые в случае, например, теплозащитных материалов, могут быть высокими. Изменения ТФХ при нагреве могут быть существенными, но по значениям ТФХ при температурах 15 — 25 °С можно сделать оценку чисел Фурье и планировать длительность испытаний.

Для температуры на внутренней поверхности слоя ТЗП из (16) следует:

$$\begin{cases} T|_{\tau=\tau_k, \eta=1} = T_{ik} = T_{kk} - \frac{h^2}{2a} \cdot (b_k - b_0) + \frac{h(S_k - S_0)}{\lambda}; \\ T|_{\tau=\tau_{k+1}, \eta=1} = T_{i,k+1} = T_{kk+1} - \frac{h^2}{2a} \cdot (b_{k+1} - b_0) + \frac{h(S_{k+1} - S_0)}{\lambda}, \end{cases}$$

откуда, учитывая, что в начальный момент $\tau_0 = 0$ значения $S_0 = b_0 = 0$, получим систему двух уравнений относительно искомых значений ТФХ — коэффициента теплопроводности λ и удельной теплоемкости c_p :

$$\begin{cases} T_{kk} - T_{nk} - \frac{\rho h^2 b_k}{2\lambda} \cdot c_p + \frac{h S_k}{\lambda} = 0; \\ T_{kk+1} - T_{nk+1} - \frac{\rho h^2 b_{k+1}}{2\lambda} \cdot c_p + \frac{h S_{k+1}}{\lambda} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Умножая первое уравнение на b_{k+1} , второе — на b_k и вычитая их друг из друга, получим выражение для λ , а после подстановки этого выражения в любое из уравнений (17) — выражение для c_p :

$$\lambda = h \frac{S_k b_{k+1} - S_{k+1} b_k}{(T_{kk+1} - T_{nk+1}) b_k - (T_{kk} - T_{nk}) b_{k+1}}; c_p = \frac{2\lambda}{\rho h^2} \cdot \frac{(T_{kk+1} - T_{nk+1}) S_k - (T_{kk} - T_{nk}) S_{k+1}}{S_k b_{k+1} - S_{k+1} b_k}. \quad (18)$$

Задачей испытаний является получение средних эффективных значений λ и c_p на интервалах (τ_{k-1}, τ_{k+1}) , и результатом обработки испытаний является построение с использованием значений λ и c_p , получаемых по формулам (18), зависимостей вида:

$$\lambda = \lambda(\bar{T}_k, \bar{b}_k), \quad c_p = c_p(\bar{T}_k, \bar{b}_k), \quad \text{где } \bar{T}_k = \frac{\bar{T}_{k-1} + \bar{T}_k + \bar{T}_{k+1}}{3}, \quad \bar{b}_k = \frac{b_k + b_{k+1}}{2},$$

где $\bar{T}_k$ — средние по толщине образцов значения температуры в моменты τ_k , которые рассчитываются по формуле:

$$\bar{T}|_{\tau=\tau_k} = \bar{T}_k = T_{\kappa k} - \frac{5h^2}{6a} b_k + \frac{hS_k}{2\lambda}.$$

Обработка результатов проводится по интервалам (τ_0, τ_2) , (τ_1, τ_3) , ..., (τ_{N-2}, τ_N) .

По сравнению с ранее опубликованными приложениями данного метода на настоящем этапе учитывается то, что значения чисел Фурье в выражениях (11) и (14) при переменном по времени коэффициенте температуропроводности $a(\tau)$ в текущие моменты времени могут быть представлены в виде:

$$Fo_i = \frac{1}{h^2} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau} a(\tau) d\tau = \frac{a_{\text{ср}i}(\tau - \tau_{i-1})}{h^2},$$

где $a_{\text{ср}i}$ — среднеинтегральное на интервале $[\tau_{i-1}, \tau]$ значение коэффициента температуропроводности [22].

Представленный выше инженерный аналитический метод решения обратной задачи теплопроводности по определению эффективных значений теплофизических характеристик материалов: коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости — в зависимости от темпов нагрева и среднеинтегральных по толщине ТЗП значений температуры использовался при обработке испытаний теплозащитных материалов. В числе других испытаний были проведены испытания двухслойных образцов углепластикового материала суммарной толщиной ~ 6 мм с целью определения ТФХ при динамическом нагреве.

На рис. 4 приведен пример графиков измерений температуры на различных глубинах образца, изготовленного по схеме рис. 3, и результатов расчетов температуры с использованием ТФХ, полученных по изложенному методу. При относительно низких температурах (от 15—

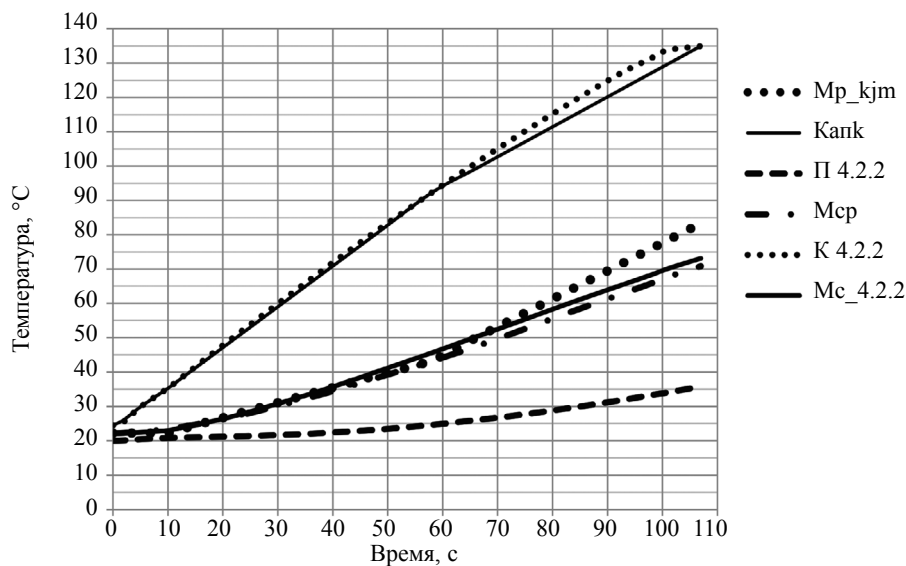


Рис. 4. Результаты измерений и расчетов температур образца углепластикового материала: Мр_kjm — расчет по аппроксимационно-суперпозиционному методу; Капк — кусочно-линейная аппроксимация температуры крышки; П 4.2.2 — измеренная температура между ТЗП и подложкой; Мср — численный расчет температуры между подслоями ТЗП с использованием полученных ТФХ; К 4.2.2 — измеренная температура крышки; Мс_4.2.2 — измеренная температура между слоями.

25 °С до начала разложения связующего) ТФХ углепластикового материала примерно равны: $\lambda = 0,5\text{—}0,8$ Вт/мК; $c_p = 900\text{—}1100$ Дж/кгК; $\rho = 1300\text{—}1400$ кг/м³. Оценки чисел Фурье с использованием этих данных показали, что при толщине слоя ТЗП испытанного образца 6 мм условие $Fo_{i-li} = \frac{a(\tau_i - \tau_{i-1})}{h^2} \geq 0,9$ выполняется при длительности интервалов $(\tau_i - \tau_{i-1})^3$ 53—111 с, и при

анализе испытания было выделено два интервала, на которых это условие выполнялось. Из рис. 4 видно, что использование полученных ТФХ дает хорошее согласование рассчитанных и измеренных значений температуры между подслоями ТЗП.

ВЫВОДЫ

Представлен метод синхронного расчета тепловлажностных режимов и изменения теплофизических и влагофизических свойств материалов, что позволяет при известных циклограммах тепловлажностного воздействия на изделия оценивать, достигнут ли критический предел изменения свойств материалов систем и элементов конструкции изделия, или, после подтверждающего комплекса УКИ в совокупности с другими испытаниями, в том числе и с использованием методов дефектоскопии, срок эксплуатации можно продлить. В частности, в обеспечение принятия такого решения может быть использован представленный в работе метод экспериментально-аналитического прогнозирования теплофизических характеристик теплозащитных материалов при переменных темпах нагрева по результатам тепловых испытаний образцов на установке лучистого нагрева с применением при анализе результатов испытаний аппроксимационно-суперпозиционного метода для решения обратной задачи теплопроводности. Метод синхронного расчета тепловлажностных режимов и изменения теплофизических и влагофизических свойств материалов может быть использован и при анализе результатов ускоренных климатических испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларионов В.В., Лидер А.М., Долматов Д.О., Седнев Д.А. Ультразвуковой контроль дефектов металлических изделий сложной формы // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 31—36.
2. Степанова Л.Н., Чернова В.В., Рамазанов И.С. Акустико-эмиссионный контроль раннего зарождения дефектов в образцах из углепластика при статическом и тепловом нагружении // Дефектоскопия. 2020. № 10. С. 12—23.
3. Вапиров Ю.М., Голован В.И., Дзюба А.С., Колесник К.А., Щербаков В.Н. Способ определения и прогнозирования влагопоглощения полимерными композиционными материалами при старении // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Т. XLVII. № 7. С. 66—76.
4. Запорожан Д.Ю., Канатов А.В., Кулаков А.А., Челомов А.А. Оценка разрушающего влияния агрессивных сред на процесс старения композитных материалов // Химическая технология и экология технологических процессов. Дизайн и технологии. 2023. № 96 (138). С. 57—62.
5. Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // Известия АлтГУ. Физика. 2020. № 1 (111). С. 41—51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06
6. Свердюк В.В., Трушкина Т.В. Анализ свойств тонкослойных покрытий, полученных ручным воздушным и автоматизированным безвоздушным методами до и после ускоренных климатических испытаний. Красноярск: Технологии ракетостроения, 2021. С. 263.
7. Севостьянов П.А., Белевитин А.А., Бурдин И.М. Марковская модель процессов релаксации и старения волокнистых материалов // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2023. № 1. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8126
8. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам. Часть 1. Испытания новых материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). С. 114—122. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122
9. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам. Часть 2. Основные тенденции // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). С. 99—108. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108
10. Брянский А.А., Башков О.В., Малышева Д.П. Исследование термоокислительного старения полимерного композиционного материала с использованием метода акустической эмиссии // Природные ресурсы арктики и субарктики. 2021. Т. 26. № 3. С. 155—168. DOI: 10.31242/2618-9712-2021-26-3-155-168
11. Кутыинов В.Ф., Киреев В.А., Старцев О.В., Шевалдин В.Н. Влияние климатического старения на характеристики упругости и прочности полимерных композитных материалов // Ученые записки ЦАГИ. 2006. Т. XXXVII. № 4. С. 54—64.

12. *Куприянов В.Н., Иванцов А.И.* Тепловое старение полимерсодержащих теплоизоляционных материалов в наружных стенах // *Архитектура и строительство. Эксперт: теория и практика.* 2020. № 3 (6). С. 31—36. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10022
13. *Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Антипов В.В., Дуонова В.А.* Методические вопросы исследования эффективности противокоррозионной защиты, применяемой в изделиях авиационной техники // *Труды ВИАМ.* 2024. № 1 (131). С. 78—91. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-78-91
14. *Дубровина Н.Н., Елиневский А.К., Костин Г.Ф., Новиков А.И., Хлыбов В.И.* Совместный расчет тепловлажностных режимов изделий с учетом изменения свойств материалов при длительных сроках хранения и эксплуатации / II Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 15—17 июля 2015. М.: ВИАМ, 2015.
15. *Дегтярь В.Г.* Применение композиционных материалов в разработках Государственного ракетного центра «КБ им. Академика В. П. Макеева» // *Конструкции из композиционных материалов.* 2004. № 1. С. 17—23.
16. *Костин Г.Ф., Калашников С.Т., Савельев В.Н., Захарьевич Д.А., Таскаев С.В., Хлыбов В.И., Швалева Р.К.* Методика и результаты оценки изменения теплофизических характеристик углепластика на основе фенолформальдегидного связующего при нагреве и разложении // *Конструкции из композиционных материалов.* 2018. № 4. С. 63—70.
17. *Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б.* Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.
18. *Несмелов В.В.* Влияние темпа нагрева на характеристики теплопереноса при термической деструкции фенольного углепластика // *Физика горения и взрыва.* 1993. Т. 29. № 6. С. 53—58.
19. *Алифанов О.М., Черепанов В.В.* Методы исследования и прогнозирования свойств высокопористых теплозащитных материалов. М.: МАИ, 2014. 264 с.
20. *Туголуков Е.Н., Карпук В.А., Рухов А.В.* Решение обратных задач теплопроводности для многослойных тел канонической формы // *Вестник ТГТУ.* 2013. Т. 19. № 3. С. 577—583.
21. *Усов А.Т.* Приближенные методы расчета температур нестационарно нагреваемых твердых тел простой формы. М.: Машиностроение, 1973. 108 с.
22. *Пехович А.И., Жидких В.М.* Расчеты теплового режима твердых тел. М.: Энергия, 1976. 352 с.
23. *Костин Г.Ф., Калашников С.Т., Гусев В.В., Решетников Н.А., Тукачева Т.В.* Применение аппроксимационно-суперпозиционного метода для восстановления теплофизических характеристик материалов по результатам тепловых испытаний // *Конструкции из композиционных материалов.* 2019. № 1. С. 37—42.
24. *Костин Г.Ф., Калашников С.Т., Гусев В.В.* Инженерный аналитический метод определения теплофизических характеристик материалов по результатам тепловых испытаний // *Конструкции из композиционных материалов.* 2021. № 3 (163). С. 39—48.

REFERENCES

1. *Larionov V.V., Lider A.M., Dolmatov D.O., Sednev D.A.* Ultrasonic inspection of defects in metal products of complex shape // *Defectoskopiya.* 2021. No. 5. P. 31—36 (in Russian).
2. *Stepanova L.N., Chernova V.V., Ramazanov I.S.* Acoustic emission control of early nucleation of defects in carbon fiber samples under static and thermal loading // *Defectoskopiya.* 2020. No. 10. P. 12—23 (in Russian).
3. *Vapiron Yu.M., Golovanov V.I., Dzyuba A.S., Kolesnik K.A., Shcherbakov V.N.* Method for determining and predicting moisture absorption by polymer composite materials during aging // *TSAGI Science Journal.* 2016. V. XLVII. No. 7. P. 66—76 (in Russian).
4. *Zaporozhan D.Yu., Kanatov A.V., Kulakov A.A., Chelomov A.A.* Assessment of the destructive effect of aggressive media on the aging process of composite materials. Chemical technology and ecology of technological processes // *Design and technology.* 2023. No. 96 (138). P. 57—62 (in Russian).
5. *Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K.* Aging of polymer composites in extremely cold climates // *Izvestiya of Altai State University. Physics.* 2020. No. 1 (111). P. 41—51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06 (in Russian).
6. *Sveredyuk V.V., Trushkina T.V.* Analysis of the properties of thin-layer coatings obtained by manual air and automated airless methods before and after accelerated climatic tests. Krasnoyarsk: Rocket science technologies, 2021. P. 263 (in Russian).
7. *Sevostyanov P.A., Belevitin A.A., Burdin I.M.* Markov model of relaxation and aging processes of fibrous materials // *Elektronny nauchny zhurnal "Inzhenerny vestnik Dona".* 2023. No. 1. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8126 (in Russian).
8. *Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V.* Current trends in the development of testing materials for resistance to climate factors (review). Part 1 // *Testing of new materials. Proceedings of VIAM.* 2021. No. 1 (95). P. 114—122. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122 (in Russian).
9. *Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V.* Current trends in the development of testing materials for resistance to climate factors (review). Part 2. Main trends // *Proceedings of VIAM.* 2021. No. 2 (96). P. 99—108. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108 (in Russian).

10. *Bryansky A.A., Bashkov O.V., Malysheva D.P.* Investigation on thermooxidative aging of the polymer composite material by acoustic emission // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021. V. 26. No. 3. P. 155—168. DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-155-168 (in Russian).
11. *Kutyinov V.F., Kireev V.A., Startsev O.V., Shevaldin V.N.* Influence of climatic aging on the elasticity and strength characteristics of polymer composite materials // *TSAGI Science Journal*. 2006. V. XXXVII. No. 4. P. 54—64 (in Russian).
12. *Kupriyanov V.N., Ivantsov A.I.* Thermal aging of polymer-containing thermal insulation material in exterior walls // *Architecture and construction. Expert: theory and practice*. 2020. No. 3 (6). P. 31—36. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10022 (in Russian).
13. *Kutyrev A.E., Vdovin A.I., Antipov V.V., Duyunova V.A.* Methodological issues of the study of the effectiveness of anticorrosive protection used in aircraft products // *Proceedings of VIAM*. 2024. No. 1 (131). P. 78—91. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-78-91 (in Russian).
14. *Dubrovina N.N., Elinevsky A.K., Kostin G.F., Novikov A.I., Khlybov V.I.* Joint calculation of heat and humidity conditions of products taking into account changes in the properties of materials during long periods of storage and operation / *Vserossiyskaya nauchno-texnicheskaya konferenciya "Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya korrozii i stareniya materialov v klimaticheskikh usloviyax: problemy i perspektivy"*. Gelendzhik. July 15—17, 2015. M.: VIAM, 2015 (in Russian).
15. *Degtiar V.G.* Use of composite materials in the Makeyev SRC developments // *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov*. 2004. No. 1. P. 17—23 (in Russian).
16. *Degtiar V.G., Kostin G.F., Kalashnikov S.T., Savelyev V.N., Zakharievich D.A., Taskaev S.V., Khlybov V.I., Shvaleva R.K.* Methodology and results of evaluation of variants in thermal and physical characteristics of a carbon fiber composite on the basis of a phenol-formaldehyde binding agent under heating and decomposition // *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov*. 2018. No. 4. P. 63—70 (in Russian).
17. *Polezhaev Yu.V., Yurevich F.B.* Thermal protection. M.: Energiya, 1976. 392 p. (in Russian).
18. *Nesmelov V.V.* Influence of the heating rate on the characteristics of heat transfer during thermal destruction of phenolic carbon fiber // *Fizika gorennya i vzryva*. 1993. V. 29. No. 6. P. 53—58 (in Russian).
19. *Alifanov O.M., Cherepanov V.V.* Methods of research and forecasting properties of highly porous heat-protective materials. M.: MAI, 2014. 264 p. (in Russian).
20. *Tugolukov E.N., Karpuk V.A., Rukhov A.V.* Solution of inverse problems of thermal conductivity for multilayer bodies of canonical form // *TSTU Journal*. 2013. V. 19. No 3. P. 577—583 (in Russian).
21. *Usov A.T.* Approximate methods for calculating the temperatures of unsteady heated solids of simple shape. M.: Mashinostroyeniye, 1973. 108 p. (in Russian).
22. *Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M.* Calculations of the thermal regime of solids. M.: Energiya, 1976. 352 p. (in Russian).
23. *Kostin G.F., Kalashnikov S.T., Gusev V.V., Reshetnikov N.A., Tukacheva T.V.* Applying an approximation-superposition method to recover thermal and physical properties of materials under results of thermal testing // *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov*. 2019. No. 1. P. 37—42 (in Russian).
24. *Kostin G.F., Kalashnikov S.T., Gusev V.V.* Engineering analytical method to define thermal and physical properties of materials under results of thermal testing // *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov*. 2021. No. 3 (163). P. 39—48 (in Russian).