РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ТОНКОЙ ПЛАСТИНКИ С КЕРМЕТНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Камолов Журабек Жалол угли
асситент кафедры «Биофизика и информационно-инновационные технологии в медицине» Бухарского государственного медицинского института им. Абу Али ибн Сино, Бухара
Саидов Сафо Олимович
кандидат химических наук, доцент кафедры «Физика» Бухарского государственного университета, Бухара

https://doi.org/10.5281/zenodo.7199434

Аннотация. *Существует большое количество материалов и технологий, которые дают возможность получить селективные покрытия, но пока не ясно, какая технология является оптимальной и наиболее удовлетворяет требованиям селективно-поглощающего покрытия для солнечного спектра. Из этого следует, что необходимо проводить более глубокие исследования по селективно-поглощающим покрытиям. С этой целью нами была разработана математическая модель нестационарного процесса нагревания и охлаждения тонкой пластинки с керметным покрытием.*

Ключевые слова. *Селективно-поглощающие покрытия, солнечный спектр, нестационарный процесс, нагревание и охлаждение, тонкая пластинка с керметным покрытием, температурная зависимость излучательной способности, срок службы и термическая стабильность коллекторов, высокотемпературное селективно - поглощающие покрытия, моделирование оптических характеристик селективно поглощающих покрытий, матричный метод, зависимость оптических постоянных или диэлектрической функции многокомпонентных систем от концентрации и оптических постоянных компонент, оптические свойства нанокомпозиционного материала, измерение степени черноты, энергетический баланс, взаимодействие, уравнение теплообмена, рассчёты матрицы угловых коэффициентов, математическая модель, разработка алгоритма, комплекс программ, регистрация сигналов термопар, выдача зависимости степени черноты покрытия.*

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A NONSTATIONARY HEATING AND COOLING PROCESS OF A THIN PLATE WITH A CERMET COATING

Abstract. *Analysis of the literature data has shown that there are a large number of materials and technologies that make it possible to obtain selective coatings, but it is not yet clear which technology is optimal and most meets the requirements of a selective-absorbing coating for the solar spectrum. It follows from this that it is necessary to conduct more in-depth research on selective absorbing coatings. For this purpose, we have developed a mathematical model of the non-stationary process of heating and cooling of a thin plate with a cermet coating.*

Keywords. *Selective-absorbing coatings, solar spectrum, non-stationary process, heating and cooling, thin plate with cermet coating, temperature dependence of emissivity, service life and thermal stability of collectors, high-temperature selective-absorbing coatings, modeling of optical characteristics of selectively absorbing coatings, matrix method, dependence of optical constants or dielectric function of multicomponent systems on concentration and optical constants of components, optical properties of nanocomposite material, measurement of*

emissivity, energy balance, interaction, heat transfer equation, slope matrix calculations, mathematical model, algorithm development, software package, registration of thermocouple signals, output dependence of the emissivity of the coating.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных селективным поглощающим покрытиям. Среди них следует выделить наиболее часто цитируемые и, по нашему мнению, полные обзоры [1-3]. Анализ литературных данных показал, что существует большое количество материалов и технологий, которые дают возможность получить селективные покрытия [2-5]. Из литературы пока не ясно, какая технология является оптимальной и наиболее удовлетворяет требованиям селективно-поглощающего покрытия для солнечного спектра. Из этого следует, что необходимо проводить более глубокие исследования по селективно-поглощающим покрытиям. С этой целью нами была разработана математическая модель нестационарного процесса нагревания и охлаждения тонкой пластинки с керметным покрытием.

На основании обзора [3] и анализа рассмотренных статей, можно сделать вывод, что общим для многих работ является метод определения температурной зависимости излучательной способности. Как правило, в спектральной области [λ_1, λ_2] измеряется коэффициент отражения $R(\lambda)$, а потом для заданной температуры по формуле (1) рассчитывается $\varepsilon(T)$:

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}[1 - R(\lambda)]B(\lambda,T)d\lambda}{\sigma T^4} \qquad (1)$$

$$B(\lambda,T) = \frac{c_1}{\lambda^5\left[e^{\frac{c_2}{kT}} - 1\right]} \qquad (2)$$

где: $B(\lambda,T)$ – спектральное распределение излучения абсолютно черного тела, функция Планка; $c_1 = 2\pi hc^2$ = 3,741832·10^{-16} $Вт{\cdot}м^2$; $c_2 = \frac{hc}{k}$ = 0,01438786 $м{\cdot}{}^0К$; c – скорость света; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; σ – постоянная Стефана–Больцмана. Очевидно, что расчет по формуле (1) может приводить к заниженному значению $\varepsilon(T)$ и соответственно к завышенному значению коэффициента селективности. В этом легко убедиться, если вспомнить, что $\int_0^\infty B(\lambda,T)d\lambda = \frac{2\pi k^4}{h^4c^2}T^4 = \sigma T^4$, откуда следует неравенство $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda,T)d\lambda < \sigma T^4$. Очевидно, что по формулам (1), (2) этого сделать невозможно, т.к. при высокой температуре оптические параметры селективно-поглощающих покрытий также будут изменяться, что приведет к другим значениям $R(\lambda)$. Поэтому нами было принято решение создать методику измерения $\varepsilon(T)$ по кривым остывания. Для решения этой задачи была разработана адекватная математическая модель и создан комплекс экспериментального оборудования.

В основе компьютерного моделирования селективных покрытий лежат рекуррентные формулы, полученные решением стационарного волнового уравнения в приближении плоских волн [6,7]. Для моделирования оптических характеристик селективно поглощающих покрытий, в состав которых входят поглощающие слои, мы выбрали матричный метод. В этом методе величину нормальной компоненты электрического поля на ***j-1*** границе получают линейным преобразованием нормальной компоненты электрического поля на ***j*** границе:

$$\begin{bmatrix} E^{(t)}_{(j-1)^-} \\ E^{(r)}_{(j-1)^-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\exp(i\varphi_j)}{g_{j-1}} & \dfrac{f_{j-1}}{g_{j-1}}\exp(-i\varphi_j) \\ \dfrac{f_{j-1}}{g_{j-1}}\exp(i\varphi_j) & \dfrac{\exp(-i\varphi_j)}{g_{j-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E^{(r)}_{j^-} \\ E^{(t)}_{j^-} \end{bmatrix} \qquad (3)$$

$$f_{j-1} = \frac{N_{j-1} - N_j}{N_{j-1} + N_j}, \qquad g_{j-1} = \frac{2N_{j-1}}{N_{j-1} + N_j} \qquad (4)$$

где: $\boldsymbol{N_j}$, $\varphi_j = \dfrac{2\pi}{\lambda} N_j d_j$, $\boldsymbol{d_j}$ – комплексный показатель преломления, фазовая и геометрическая толщина ***j***-ой пленки. Удобство матричной записи состоит в простоте и компактности рекуррентной процедуры, связывающей компоненты волнового поля на границе раздела сред. Последовательным применением (4) можно получить амплитуды электрического поля отраженной и прошедшей волн со стороны среды, из которой падает свет, с учетом граничных условий на границе раздела последней пленки и подложки, т.е. ***m***-ой границе, в следующей форме:

$$\begin{bmatrix} E^{(t)}_{0^-} \\ E^{(r)}_{0^-} \end{bmatrix} = M_1 M_2 M_3 \dots M_{m-1} \begin{bmatrix} E^{(t)}_{(m)^-} \\ E^{(r)}_{(m)^-} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \dfrac{1}{2}\left(1 + \dfrac{n_m}{n_{m-1}}\right) \\ \dfrac{1}{2}\left(1 - \dfrac{n_m}{n_{m-1}}\right) \end{bmatrix} \qquad (5)$$

где $M = \prod_{j=1}^{m-1} M_j$

Прогнозирование (моделирование) оптических характеристик селективно поглощающих покрытий, в состав которых входит нанокомпозиционный материал, полученный углеродным восстановлением одного из металлов смеси оксидов, невозможно без построения адекватной математической модели, описывающей оптические характеристики многокомпонентных систем. Модель должна учитывать зависимость оптических постоянных или диэлектрической функции многокомпонентных систем от концентрации и оптических постоянных компонент.

МЕТОД И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время классификация диэлектрических свойств многокомпонентных дисперсных систем осуществляется по внешнему признаку их пространственного строения. Различают статистические системы с хаотически флуктуирующей в пространстве диэлектрической проницаемостью и матричные, в которых частицы дисперсной фазы ***1*** (наполнитель) с диэлектрической функцией $\boldsymbol{\varepsilon_1}$ распределены в непрерывной дисперсионной среде ***2*** (матрица) с диэлектрической функцией $\boldsymbol{\varepsilon_2}$. Если объемные доли соответствующих компонент $\boldsymbol{f_1}$ и $\boldsymbol{f_2}$, то для статической системы диэлектрическая функция $\boldsymbol{\varepsilon}$ симметрична относительно своих компонент $\boldsymbol{\varepsilon_m}$ = $\varphi(\varepsilon_1,\varepsilon_2,f_1,f_2) = \varphi(\varepsilon_2,\varepsilon_1,f_2,f_1)$, т.е. фазы ***1*** и ***2*** эквивалентны. В случае матричной системы дисперсная фаза и дисперсная среда неэквивалентны, поэтому при перемене индексов вид функции $\boldsymbol{\varepsilon_m}$ изменяется (обращение фаз): $\boldsymbol{\varepsilon} = \varphi(\varepsilon_1,\varepsilon_2,f_1,f_2) \neq \varphi(\varepsilon_2,\varepsilon_1,f_2,f_1)$. По мере увеличения концентрации дисперсной фазы матричная система постепенно приближается к статистической, а при уменьшении одного из компонентов статистическая система приближается к матричной с матрицей из преобладающего компонента.

Оптические свойства нанокомпозиционного материала, в состав которого входят три компонента: металл и два оксида, зависят от концентрации и оптических постоянных компонентов. Поэтому для моделирования оптических свойств трехкомпонентной среды была выбрана модель эффективной среды Бруггемана [8]. В общем случае формула Бруггемана для статистической системы, в состав которой входят ***m*** компонент, имеет вид:

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{m} f_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m} = 0 \\ &\sum_i f_i = 1 \end{aligned} \qquad (6)$$

где: $\boldsymbol{\varepsilon_i}$, $\boldsymbol{f_i}$ – диэлектрическая проницаемость и объемная концентрации ***i***-ой компоненты; $\boldsymbol{\varepsilon_m}$ – диэлектрическая проницаемость эффективной среды (смеси). Запишем формулу (3) в явном виде для двухкомпонентной среды (смесь оксидов):

$$f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m} + f_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_m}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_m} = 0 \qquad (7)$$

$$f_1 + f_2 = 1 \qquad (8)$$

Если выразить из (7) $\boldsymbol{\varepsilon_m}$, то получим квадратное уравнение, которое, как известно, имеет два корня. Выражение (6) для трехкомпонентной среды (смесь металла и оксидов) имеет вид:

$$f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m} + f_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_m}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_m} + f_3 \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_m}{\varepsilon_3 + 2\varepsilon_m} = 0 \qquad (9)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1 \qquad (10)$$

Если явно выразить из (9) $\boldsymbol{\varepsilon_m}$, то получим уравнение третьей степени. Как известно, уравнение третьей степени с постоянными коэффициентами в зависимости от дискриминанта может иметь один действительный и два комплексных корня, три действительных корня, два из которых равны между собой, или три разных действительных корня [7].

Таким образом, выражения (7) и (9) являются основными при расчете диэлектрической проницаемости смеси (показателей преломления и поглощения), но при этом возникает проблема выбора решения соответствующего уравнения [9], [10].

На основании анализа литературы и собственного опыта моделирования сложных композиционных систем, была создана компьютерная программа, позволяющая с достаточной степенью точности моделировать оптические характеристики селективно поглощающих покрытий, в состав которых входит нанокомпозиционный материал, полученный углеродным восстановлением одного из металлов смеси оксидов. В основе алгоритма формулы (7) и (9), а также результаты математической обработки оптических измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для измерения степени черноты необходимо учесть геометрические особенности измерительной установки. Уточним геометрический вид поверхностей, участвующих в теплообменных процессах с остывающим образцом. Наиболее правдоподобно можно представить подъёмный купол установки РР-601 в его верхней части сферическим сегментом, переходящим в цилиндр. Нижний торец цилиндра прижимается к плоскому основанию, являющемуся массивной плоской плитой.

Обозначим номерами в качестве отдельных элементов:

1. верхнюю плоскую поверхность образца с температурой $\boldsymbol{T_1(t)}$ и со степенью черноты $\boldsymbol{\varepsilon_1}$;

2. поверхность сферического сегмента с постоянной температурой корпуса $\boldsymbol{T_2 = T_{кор}}$ и со степенью черноты $\boldsymbol{\varepsilon_{кор}}$;

3. часть цилиндрической поверхности, расположенную над плоскостью образца, с температурой $\boldsymbol{T_3 = T_{кор}}$ и со степенью черноты $\boldsymbol{\varepsilon_{кор}}$;

4. нижнюю плоскую поверхность образца с температурой $\boldsymbol{T_4(t) = T_1(t)}$ и со степенью черноты $\boldsymbol{\varepsilon_2}$;

5. нижнюю часть цилиндрической поверхности, находящуюся ниже плоскости образца, с постоянной температурой $\boldsymbol{T_5 = T_{кор}}$ и со степенью черноты $\boldsymbol{\varepsilon_{кор}}$;

6. нижний плоский диск с постоянной температурой $\boldsymbol{T_6 = T_{кор}}$ и со степенью черноты $\boldsymbol{\varepsilon_{кор}}$.

Математическое описание процессов теплопередачи между отдельными конструктивными элементами предполагает:

– взаимный обмен лучистой энергии происходит по законам теплообмена между диффузно отражающими серыми телами;

– необходимые для расчётов теплофизические характеристики применяемых материалов и их зависимости от температуры известны.

Для каждого момента времени при регулярном режиме остывания образца соотношения между множеством тепловых потоков сохраняются такими же, как и в условиях термической стабильности замкнутой системы элементов установки. Следовательно, аналитические выражения соответствующих соотношений можно получить из решения подобной задачи в условиях термостабильности.

Требование энергетического баланса для каждого элемента $\boldsymbol{k}$ замкнутой системы при общей термической стабильности системы имеет вид:

$$\boldsymbol{W_k^{\text{рез}} = W_k^{\text{эфф}} - W_k^{\text{пад}}},$$

где: $\boldsymbol{W_k^{\text{рез}}}$ – результирующий поток, поступающий на элемент $\boldsymbol{k}$, который складывается из $\boldsymbol{W_k}$ подводимого извне потока и $\boldsymbol{W_k^{\text{погл}}}$ – поглощённой части падающего на элемент $\boldsymbol{k}$ суммарного потока $\boldsymbol{W_k^{\text{пад}}}$ от остальных элементов замкнутой системы, $\boldsymbol{W_k^{\text{эфф}}}$ – эффективный поток, исходящий от элемента $\boldsymbol{k}$ ко всем остальным элементам. Эффективный поток состоит из излучения Планка от элемента $\boldsymbol{k}$ для его температуры $\boldsymbol{T_k}$ и отражённого от элемента $\boldsymbol{k}$ излучения всех остальных элементов замкнутой системы.

Условие энергетического баланса требует равенства результирующего теплового потока на элемент $\boldsymbol{k}$ и эффективного потока от элемента $\boldsymbol{k}$.

Учитывая площади каждого элемента $\boldsymbol{S_k}$, можно перейти от тепловых потоков к плотностям потоков $\boldsymbol{\widehat{w}}$:

$$\boldsymbol{\widehat{w}_k^{\text{рез}} = \widehat{w}_k^{\text{эфф}} - \widehat{w}_k^{\text{пад}}} \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\widehat{w}_k^{\text{рез}} = \varepsilon_k \cdot \sigma \cdot T_k^4 + (1 - \varepsilon_k) \cdot \widehat{w}_k^{\text{пад}}} \quad (12)$$

Энергетическое взаимодействие между $\boldsymbol{k}$-тым элементом и $\boldsymbol{j}$-тым элементом во многом определяется геометрическим расположением этих элементов и математически описывается интегрированием потоков излучения по поверхностям $\boldsymbol{k}$-того и $\boldsymbol{j}$-того элементов. Для учёта геометрических факторов энергетического взаимодействия вводится понятие среднего углового коэффициента $\boldsymbol{F_{k\to j}}$. Поток падающего на элемент $\boldsymbol{k}$ излучения определяется суммой

$$\boldsymbol{S_k \cdot \widehat{w}_k^{\text{пад}} = \Sigma_j S_j \cdot \widehat{w}_j^{\text{эфф}} \cdot F_{j\to k}}$$

потоков эффективных излучений остальных элементов, умноженных на средние угловые коэффициенты $\boldsymbol{F_{j\to k}}$, которые определяют долю общего эффективного потока $\boldsymbol{j}$-того элемента, направленного на элемент $\boldsymbol{k}$. Пользуясь соотношением взаимности для любых угловых коэффициентов $\boldsymbol{S_j \cdot F_{j\to k} = S_k \cdot F_{k\to j}}$, можно записать плотность падающего на элемент $\boldsymbol{k}$ потока в виде:

$$\boldsymbol{\widehat{w}_k^{\text{пад}} = \Sigma_j\, \widehat{w}_j^{\text{эфф}} \cdot F_{k\to j}} \quad (13)$$

Для каждой пары элементов своей конструкции необходимо вывести аналитические выражения среднего углового коэффициента путём интегрирования по поверхностям соответствующих элементов. Накопленные в литературе [11], [12] аналитические выражения угловых коэффициентов для ряда простейших геометрических форм элементов и их пространственного расположения упрощают решение этой задачи, но тогда возникает требование к соответствию использованных готовых решений формам и геометрической конфигурации реальной термической установки.

Для каждого элемента $\boldsymbol{k}$ энергетическое взаимодействие с остальными элементами замкнутой термической системой описывается отдельным уравнением:

$$\boldsymbol{\Sigma_j \left[\delta_{kj}/\varepsilon_j - F_{k\to j}\left(1 - \varepsilon_j\right)/\varepsilon_j\right] \cdot \widehat{w}_j^{\text{рез}} = \Sigma_j\left(\delta_{kj} - F_{k\to j}\right) \cdot \sigma T_j^4},$$

где: $\boldsymbol{j}$ пробегает значения от $\boldsymbol{1}$ до $\boldsymbol{n}$. Здесь через $\boldsymbol{n}$ обозначено общее количество элементов в замкнутой конструкции. Приведём это уравнение к более удобному виду:

$$\boldsymbol{\widehat{w}_k^{\text{эфф}} - (1 - \varepsilon_k) \cdot \Sigma_{j\neq k} F_{k\to j} \cdot \widehat{w}_j^{\text{эфф}} = \varepsilon_k \cdot \sigma \cdot T_k^4} \quad (14)$$

Таким образом, в замкнутой конструкции соотношения между множеством тепловых потоков описываются линейной системой $\boldsymbol{n}$ уравнений относительно $\boldsymbol{n}$ неизвестных результирующих потоков $\boldsymbol{\widehat{w}_j^{\text{эфф}}}$ для заданных значений температур $\boldsymbol{T_j}$ всех её элементов.

При регулярном режиме остывания в каждый момент времени $\boldsymbol{t}$ меняются не только свободные члены, определённые через температуру образца $\boldsymbol{T_1}$ и $\boldsymbol{T_4}$, в уравнениях (11) и (14), изменяются и угловые коэффициенты $\boldsymbol{F_{k\to j}}$, связанные с изменением размеров площади образца за счёт изменения его температуры.

Определим вид аналитической зависимости S_1 от температуры. Масса образца определяется через плотность, площадь и толщину

$$m_{\text{обр}} = D_{\text{обр}} \cdot S_1 \cdot \Delta_{\text{обр}},$$

масса не зависит от температуры, т.е. в пределах рабочих температур нет сублимации материала элемента.

Масса определяется взвешиванием, зависимость $D_{обр}$ от температуры заимствуется из справочников в пределах от T_0 до T_{max}. Геометрические размеры элемента измеряются при комнатной температуре $S_k^{\text{ком}} = d_1^{\text{ком}} \cdot d_2^{\text{ком}}$ и $\Delta_k^{\text{ком}}$; или $m_k = D_k^{\text{ком}} \cdot S_k^{\text{ком}} \cdot \Delta_k^{\text{ком}}$. Предполагая анизотропность материала нагреваемого образца зависимости линейных размеров d_1, d_2 и Δ_k от температуры описываются единообразно через $\beta_k(T)$, т.е. представляются в виде:

$$L(T) = L^{\text{ком}} \cdot [1 + \beta(T)].$$

Фиксированное значение массы элемента при изменяющейся от температуры плотности позволяет определить зависимость β от температуры для использованного материала:

$$\begin{aligned} m_{\text{обр}} &= D_{\text{обр}}(T) \cdot d_1(T) \cdot d_2(T) \cdot \Delta_{\text{обр}}(T) \\ &= D_{\text{обр}}(T) \cdot d_1^{\text{ком}} \cdot d_2^{\text{ком}} \cdot \Delta_{\text{обр}}^{\text{ком}} \cdot [1 + \beta(T)]^3 \\ &= m_{\text{обр}} \cdot [1 + \beta(T)]^3 \cdot D_{\text{обр}}(T)/D_{\text{обр}}^{\text{ком}} \end{aligned}$$

или

$$[1 + \beta(T)]^3 = D_{\text{обр}}^{\text{ком}}/D_{\text{обр}}(T).$$

Отсюда получаем зависимость площади образца от температуры в виде:

$$S_1(T) = S_1^{\text{ком}} \cdot \left[D_{\text{обр}}^{\text{ком}}/D_{\text{обр}}(T)\right]^{2/3} \quad (15)$$

Эта зависимость непосредственно используется при рассчётах матрицы угловых коэффициентов $F_{k \to j}$.

Обозначим через $Q_{обр}$ тепловую энергию образца на момент времени t:

$$Q_{\text{обр}} = m_{\text{обр}} \cdot C_{\text{обр}}(T_{\text{обр}}) \cdot T_{\text{обр}}$$

где: $C_{обр}$ – удельная теплоёмкость материала, из которого изготовлен образец, $m_{обр}$ – его масса, $T_{обр}$ – его температура в момент времени t.

Скорость изменения накопленной энергии образца в нестационарных условиях определяется мощностью, поступающей на образец (в том числе и извне – $W_{обр}$) и мощностью теплового потока, исходящего от обеих поверхностей образца, обозначенных в нашей конструкции как элементы 1 и 4:

$$dQ_{\text{обр}}/dt = W_{\text{обр}} + W_1^{\text{погл}} - W_1^{\text{эфф}} + W_4^{\text{погл}} - W_4^{\text{эфф}}.$$

Рассмотрим только режим остывания, т.е. будем считать $W_{обр}$ равной нулю с момента времени $t = 0$. Будем рассматривать на первом этапе остывание образца без покрытия, т.е. считаем, что $\varepsilon_1 = \varepsilon_4$. Перейдём от скорости изменения накопленной энергии образца к скорости изменения его температуры:

$$\begin{aligned} &m_{\text{обр}} \cdot dT_{\text{обр}}/dt \cdot [C_{\text{обр}} + T_{\text{обр}} \cdot dC_{\text{обр}}/dT]/S(T_{\text{обр}}) = \\ &-(\widehat{w}_1^{\text{эфф}} + \widehat{w}_4^{\text{эфф}}) + \varepsilon_4 \cdot [(\widehat{w}_1^{\text{эфф}} + \widehat{w}_4^{\text{эфф}}) - 2\varepsilon_4 \sigma T_{\text{обр}}^4]/(1 - \varepsilon_4) \end{aligned} \quad (16)$$

Уравнение теплообмена образца в режиме остывания является дифференциальным уравнением первого порядка относительно температуры образца, определяющееся плотностями эффективных потоков $\widehat{\boldsymbol{w}}_1^{эфф}$ и $\widehat{\boldsymbol{w}}_4^{эфф}$ для элементов ***1*** и ***4***.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полномасштабный учёт теплового взаимодействия всех элементов замкнутой системы обеспечивается решением ***n*** линейных алгебраических уравнений относительно ***n*** неизвестных эффективных плотностей потоков $\widehat{\boldsymbol{w}}_k^{эфф}$ каждого элемента ***k***

$$\widehat{\boldsymbol{w}}_k^{эфф} \cdot G_{k,k} - \sum_{j \neq k} \widehat{w}_j^{эфф} \cdot G_{k,j} = B_k \qquad (17)$$

Свободные члены в уравнениях $\boldsymbol{B_k}$, определяются температурами элементов, а коэффициенты матрицы $\boldsymbol{G_{k,j}}$ связаны с угловыми коэффициентами $\boldsymbol{F_{k \to j}}$ системы:

$$\boldsymbol{B_k = \varepsilon_k \cdot \sigma \cdot T_k^4}$$

$$\boldsymbol{G_{k,k} = [1 - (1 - \varepsilon_k) \cdot F_{k \to k}]; \; G_{k,j} = -(1 - \varepsilon_j) \cdot F_{k \to j}}$$

Входящие в уравнение теплообмена образца плотности эффективных потоков $\widehat{\boldsymbol{w}}_1^{эфф}$ и $\widehat{\boldsymbol{w}}_4^{эфф}$ определяются в результате решения системы уравнений (17).

Выделим в уравнении (16) множитель, связанный с физическими характеристиками подложки (образца) и обозначим его как функцию

$$\boldsymbol{M(T - T_{ком}) = m_{обр} \cdot [C_{обр} + T_{обр} \cdot dC_{обр}/dT]/S(T_{обр})}$$

Проведём аппроксимацию справочных данных по теплоёмкости ограниченным степенным рядом:$\boldsymbol{C_{обр} = \sum_{i=0}^{5} C_i \cdot (T - T_{ком})^i}$, тогда производная от теплоёмкости по температуре подсчитывается по тем же коэффициентам разложения как $\boldsymbol{dC_{обр}/dT = \sum_{i=0}^{5} C_i \cdot i \cdot (T - T_{ком})^{(i-1)}}$.

Таким образом, физический множитель рассчитывается при каждой температуре образца следующим способом:

$$\boldsymbol{M(T - T_{ком}) = m_{обр} \cdot \sum_{i=0}^{5} [C_i \cdot (T - T_{ком})^i] \cdot \sum_{i=0}^{5} [C_i \cdot i \cdot (T - T_{ком})^{(i-1)} \cdot [D_{обр}(T) \,/\, D_{обр}^{ком}]^{2/3} / S_{обр}^{ком}} \qquad (18)$$

На первом этапе производится переработка фиксирующихся в экспериментальной серии отсчётов температур с целью сгладить влияние разного вида погрешностей измерительной аппаратуры.

Весь временной ход температуры остывающего образца аппроксимируется ограниченным степенным рядом по времени:

$$\boldsymbol{T(t) = \sum_{i=1}^{m} C_i \cdot t^k},$$

где ***k = i – 1***.

Такое представление экспериментальных отсчётов позволяет не только сгладить ошибки эксперимента, но и рассчитать как температуры, так и скорости изменения температуры ***DT(t)*** для любого промежуточного момента времени:

$$\boldsymbol{DT(t) = \sum_{i=1}^{m} C_i \cdot (k - 1) \cdot t^{(k-2)}}$$

Коэффициенты степенного ряда определяются из условия минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных отсчётов в принятой нами зависимости от времени.

Нами используются последовательно два различных функционала отклонений – один сглаживает влияние относительных шумов (уровень которых пропорционален величине мгновенного экспериментального отсчёта), а другой сглаживает влияние постоянных во времени шумов измерительной установки.

ВЫВОД

Рассмотрим наиболее простой для расчётов вариант оптических характеристик корпуса измерительной установки, т.е. предположим, что все элементы корпуса установки имеют значение степени черноты равное единице. При измерениях образца без покрытия уравнения для эффективной плотности потоков всех элементов корпуса переходят в равенства: $\boldsymbol{\widehat{w}_2^{\text{эфф}} = \widehat{w}_3^{\text{эфф}} = \widehat{w}_5^{\text{эфф}} = \widehat{w}_6^{\text{эфф}} = \sigma T_{\text{кор}}^4}$. Тогда плотности потоков с обеих поверхностей образца оказываются совпадающими:

$$\boldsymbol{\widehat{w}_1^{\text{эфф}} = \widehat{w}_4^{\text{эфф}} = \varepsilon_{\text{обр}} \cdot \sigma \cdot \left(T_{\text{обр}}^4 - T_{\text{кор}}^4\right) + \sigma T_{\text{кор}}^4}$$

Подставим полученные значения плотностей потоков в уравнение для скорости изменения температуры охлаждающегося образца. Если рассматривать значения температуры и значения скорости охлаждения в этом уравнении как известные величины в результате обработки сигналов ВИСЧ, то уравнение преобразуется в квадратное уравнение относительно неизвестной степени черноты образца $\boldsymbol{\varepsilon_{обр}}$.

Обозначим $\boldsymbol{H_1 = dT_{\text{обр}} / dt \cdot M(T - T_{\text{ком}})}$; $\boldsymbol{P_1 = 4\sigma(T_{\text{обр}}^4 - T_{\text{кор}}^4)}$. Тогда решение для степени черноты выглядит так:

$$\boldsymbol{\varepsilon_{\text{обр}}(T) = 1 + H_1 / P_1 - \sqrt{(1 + H_1 / P_1)^2 + 2 \cdot H_1 / P_1}}$$

При измерении образца с односторонним покрытием плёнкой со степенью черноты $\boldsymbol{\varepsilon_{пок}}$ эффективные плотности потоков с элементов корпуса сохранят свои равенства, выражение для плотности потока с тыльной поверхности образца $\boldsymbol{\widehat{w}_4^{\text{эфф}}}$ также останется без изменения. Изменится только выражение для эффективной плотности потока с верхней поверхности образца, т.е. с покрытия:

$$\boldsymbol{\widehat{w}_1^{\text{эфф}} = \varepsilon_{\text{пок}} \cdot \sigma\left(T_{\text{обр}}^4 - T_{\text{кор}}^4\right) + \sigma T_{\text{кор}}^4.}$$

Подстановка выражений эффективных плотностей потоков в уравнение для скорости охлаждения приводит вновь к квадратному уравнению относительно $\boldsymbol{\varepsilon_{пок}}$.

$$\boldsymbol{\varepsilon_{\text{пок}}^2 \cdot P_2 + \varepsilon_{\text{пок}} \cdot \left(R_2 + \sigma T_{\text{кор}}^4\right) - R_2 = 0,}$$

где: $\boldsymbol{P_2 = \sigma\left(2T_{\text{обр}}^4 - T_{\text{кор}}^4\right)}$ и $\boldsymbol{R_2 = M \cdot dT/dt + \varepsilon_{\text{обр}} \cdot \sigma T_{\text{обр}}^4 + \sigma T_{\text{кор}}^4}$.

Решение квадратного уравнения для степени черноты исследуемого покрытия $\boldsymbol{\varepsilon_{пок}}$ представляется в предложенных обозначениях в виде:

$$\boldsymbol{\varepsilon_{\text{пок}} = -\frac{R_2 + \sigma T_{\text{кор}}^4}{2P_2} + \frac{\sqrt{\left(R_2 + \sigma T_{\text{кор}}^4\right)^2 + 2R_2P_2}}{2P_2}.}$$

В измеренные численные значения функции $\boldsymbol{\varepsilon_{пок}(T)}$ информация, извлечённая из первого измерения, входит в выражение $\boldsymbol{R_2}$ в виде известной функции $\boldsymbol{\varepsilon_{обр}(T)}$.

Таким образом, на основании математической модели разработан алгоритм, написан и отлажен комплекс программ, начиная от регистрации сигналов термопар до выдачи зависимости степени черноты покрытия от температуры в широком диапазоне.

REFERENCES

1. С.О. Саидов, Ж. Камалов и др. Анализ влияния толщины прозрачного проводящего покрытия и температуры отжига на оптические и электрофизические свойства покрытия на примере Zn(Al)O (AZO).//Results of National Scientific Research Journal. May 2022. In Vol. 1. (24.05.2022).
2. C.E. Kennedy. "Review of Mid- to High-Temperature Solar Selective Absorber Materials". *// NREL/TP – 520–31267*. 2002. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
3. С.Х. Сулейманов, P. Berger, M. Kim, В.Г. Дыскин, М.У. Джанклич, О.А. Дудко, А.Г. Бугаков, Н.А. Кулагина “Просветляющие композитные покрытия для солнечных органических элементов” // Гелиотехника. 2016. № 2. С. 71 – 72.
4. Файзиэв Ш. Ш. и др. Композицион қопламаларнинг акс эттириш спектрларини ўлчаш, селективлик коэффициентини аниқлаш //Science and Education. – 2022. – Т. 3. – №. 4. – С. 401-404.
5. Olimovich S. S., Ugli K. Z. J. To Secure Your Paper As Per UGC Guidelines We Are Providing A Electronic Bar Code
6. Саидов С. О. и др. Механизм электропроводности собственного полупроводника с точки зрения зонной теории //PEDAGOGS jurnali. – 2022. – Т. 6. – №. 1. – С. 409-414.
7. Feng Cao, Kenneth McEnaney, Gang Chen and Zhifeng Ren. "A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers" // Energy Environ. Sci. 2014. V. 7. P. 1615 – 1627.
8. Cheryl E. Kennedy. "Progress to develop an advanced solar-selective coating". *// 14th Biennial CSP SolarPACES (Solar Power and Chemical Energy Systems) Symposium*. March 4 – 7, 2008. Las Vegas, Nevada.
9. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука. 1970. 856 с.
10. П.Х. Бернинг. Теория и методы расчета оптических свойств тонких пленок // Физика тонких пленок: в 8т. // Под. ред. Г. Хасса. М. 1967. Т. 1. С. 91 – 151.
11. Atoyevich T. A. et al. Diod rejimida ulangan maydon tranzistoriga yorug’lik ta’sirini o’rganish //Results of National Scientific Research. – 2022. – T. 1. – №. 2. – С. 106-110.