



Calorimetric Testing Methods of Thermo-radiation Characteristics of Energy Effective Coatings

Vitalii BABAK¹, Leonid VOROBIOV¹, Leonid DEKUSHA¹, Valentin VOLKOV²,
Zinaida BUROVA³, Oleg DEKUSHA¹, Svetlana KOVTUN¹

¹ Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine
e-mail: vdoe@ukr.net; teplomer@ukr.net

² E.O. Paton Institute of Electric Welding of the National Academy of Sciences of Ukraine

³ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Abstract

The urgency of developing technologies for deposition of spectral-selective coatings on the deployable structures of space facilities and the development of methods for testing their thermoradiation characteristics is shown. The application of calorimetric methods for testing of energy-efficient coatings is suggested, the structure and the ratio of the geometric dimensions of the corresponding equipment are justified. The results of an investigation of the emission coefficient and the absorption coefficient of solar radiation for coating the layered structure of Al+TiO₂ are presented.

Keywords: thermoradiation characteristics, multilayer thermal control coatings, calorimetric methods of measurement, solar radiation absorption coefficient, emission coefficient.

Калориметрические методы контроля терморadiационных характеристик энергоэффективных покрытий

Виталий БАБАК, Леонид ВОРОБЬЁВ, Леонид ДЕКУША, Валентин ВОЛКОВ,
Зинаида БУРОВА, Олег ДЕКУША, Светлана КОВТУН

1. Введение

Одним из способов обеспечения теплового режима конструкций является оптимизация радиационного теплообмена поверхности с окружающей средой. Очень часто для выполнения своих функций поверхности оборудования, строительной конструкции или летательного аппарата должны обладать существенно различными значениями терморadiационных характеристик в различных диапазонах спектра излучения. Так, например, энергосберегающие оконные стекла должны, с одной стороны, иметь высокий коэффициент пропускания в видимой части спектра, а с другой стороны, иметь малое значение излучательной способности (степени черноты, коэффициента эмиссии) в инфракрасной области спектра, характерной для теплообмена излучением при близкой к комнатной температуре. Для решения таких задач в последние десятилетия интенсивно создаются новые материалы и покрытия, обладающие заданными селективными терморadiационными характеристиками, а также средства определения их терморadiационных характеристик (ТРХ).

Активно развиваются технологии создания спектрально-селективных покрытий для аэрокосмической аппаратуры. Такие покрытия используются для поддержания необходимого теплового режима и соответственно называются терморегулирующими покрытиями. Как правило, для космической техники является актуальной возможность высокой теплоотдачи с поверхности аппарата теплоты, выделяющейся при работе

встроенного оборудования, то есть покрытие должно иметь высокое (близкое к 1,0) значение излучательной способности и как можно более малое значение коэффициента поглощения солнечного излучения A_s . В статье рассмотрен частный случай пассивного терморегулирования металлической оболочечной конструкции, для которой требуется соблюдение определенного достаточно узкого диапазона соотношений терморadiационных характеристик.

2. Анализ публикаций.

В большинстве случаев, использование пассивного терморегулирования для обеспечения теплового режима конструкций космической техники сводится к тепловой изоляции их поверхностей (многослойная изоляция, пены) либо к нанесению на нее покрытий различных типов [1, 2]. В классе раскрывающихся конструкций собственно теплоизолирующие материалы могут являться основой для построения поверхности; в частности, в рефлекторе для надувной антенны IAE [3] был использован алюминизированный майлар, в оболочке Optical Calibration Sphere [4] – алюминизированный каптон. Тем не менее, в новых типах раскрывающихся конструкций на основе экстремально деформируемых тонких металлических оболочек – конструкциях преобразуемого объема (КПО) [5] использование тепловой изоляции, как и использование большинства известных контактных, пигментных и конверсионных терморегулирующих покрытий неприемлемо по причине значительных геометрических искажений поверхностей в процессе их преобразования. В данном случае покрытие должно обладать достаточной адгезией к поверхности конструкции, устойчивостью к деградации при длительном воздействии факторов космического пространства (ФКП) и способностью испытывать многократные неразрушающие изгибания с сохранением требуемых функциональных свойств.

Температура T_S поверхности оболочки КПО из нержавеющей стали, имеющей высокий коэффициент теплового расширения, в основном определяет ее напряженно-деформированное состояние в условиях отсутствия конвективной составляющей теплообмена. Применительно к металлической КПО установлен допустимый диапазон температур T_S поверхности конструкции $230 \text{ K} \leq T_S \leq 336 \text{ K}$, который регламентирован как возможный для непродолжительного контакта оператора в скафандре с внешней поверхностью международной космической станции (МКС) [6].

Величина T_S в стационарных условиях в вакууме космического пространства при прочих равных условиях определяется только отношением коэффициента поглощения солнечной радиации к коэффициенту излучения (эмиссии) поверхности A_s/ε [7]. С учетом указанных выше требований к обеспечению интервала изменения температуры поверхности конструкции, соотношение A_s/ε должно находиться в интервале значений от 0,7 до 1,5. Приемлемый результат может быть получен при использовании многослойных покрытий из металлических материалов с толщиной верхнего слоя, достаточной для пропускания радиационного потока энергии. В качестве материалов для слоев покрытия можно использовать, например, алюминий, широко используемый в системах обеспечения теплового режима аэрокосмической техники благодаря низким значениям коэффициента эмиссии, и диоксид титана (IV) TiO_2 , сочетающий приемлемые терморadiационные характеристики с высокой устойчивостью к деградации под действием ФКП. Эффективность использования TiO_2 в качестве компонента терморегулирующих покрытий описана, в частности, в [8]. Алюминиевая прослойка выполняет также демпфирующую функцию, предотвращая отслоение внешнего покрытия при изгибании оболочки конструкций.

При разработке и производстве новых энергоэффективных конструкций и технологий нанесения покрытий необходим постоянный или выборочный контроль терморadiационных характеристик. Широкое распространение получили как спектрометрические [9...11], так и тепловые (калориметрические) методы контроля ТРХ. Спектрометрические методы контроля требуют применения сложных и дорогих спектрофотометров, работающих в широком спектральном диапазоне – от дальнего инфракрасного до ультрафиолетового излучения. Согласно [11] измерения проводят в 30 точках спектрального диапазона при нормальном воздействии излучения, а интегральный полусферический коэффициент эмиссии определяют расчетным способом с применением расчетно-эмпирических весовых коэффициентов, учитывающих спектральное распределение интенсивности излучения и взаимосвязь между нормальной и полусферической характеристикой.

Калориметрические (тепловые, теплотметрические) методы исследования позволяют определять ТРХ при использовании относительно простых и недорогих средств измерения [12, 13]. Калориметрические методы, как правило, предполагают создание определенных условий радиационного теплообмена образца с исследуемым покрытием и окружающими объектами; измерение теплового потока через образец и температуры его поверхности; расчет терморadiационных характеристик на основании полученных данных и известных законов теплообмена. В большинстве случаев рабочий объем измерительной камеры необходимо вакуумировать для исключения влияния кондуктивно-конвективного теплообмена через воздух, что приводит к усложнению калориметрических средств измерения.

3. Цель исследования

Целью работы является показать перспективность калориметрических измерений терморadiационных характеристик без вакуумирования объема измерительной камеры, обосновать структуру и характеристики оборудования для этих исследований, провести экспериментальную проверку метода и оборудования на реальных образцах материалов для космической техники.

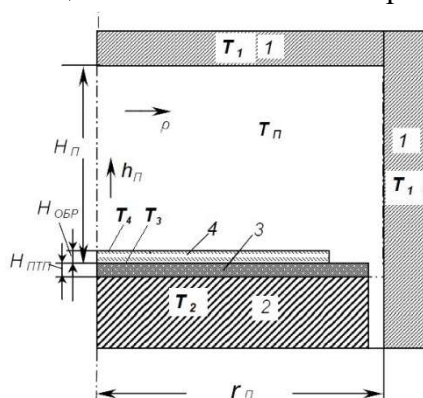
4. Аппаратура и методики исследований

4.1 Система для измерения ТРХ в инфракрасном спектре.

Разработана измерительная система, предназначенная для измерения интегральных полусферических ТРХ (коэффициентов излучения, поглощения и отражения) в длинноволновой области спектра инфракрасного излучения различных материалов и покрытий. В системе реализован калориметрический метод измерения, который предусматривает получение первичной измерительной информации с применением термоэлектрических преобразователей теплового потока (ПТП) [14]. Точность измерения в приборах такого типа зависит как от степени полусферичности падающего излучения, так и от однородности измеряемой плотности теплового потока. Для минимизации методической составляющей погрешности измерения необходимо чтобы чувствительный элемент ПТП находился в зоне одномерности теплового потока, вследствие чего измеренная плотность теплового потока будет равна величине плотности теплового потока, входящего в образец.

На Рис. 1 приведена упрощенная структура теплового блока системы, который состоит из полостного излучателя 1, теплостока 2, пластины преобразователей теплового потока 3 и исследуемого образца 4. Полость имеет форму кругового цилиндра, на внешних поверхностях его верхнего торца и боковой цилиндрической поверхности

поддерживается постоянная температура T_1 , а на поверхности нижнего торца поддерживается температура T_2 . Внутренняя поверхность полости, имеющая форму перевернутого стакана, является излучающей и служит источником теплового излучения (ИТИ). На внутренней стороне нижнего торца помещен исследуемый образец материала с нанесенным на него покрытием. Заданный посредством ИТИ поток теплового излучения, в общем случае, частично отражается от поверхности образца в сторону источника, а частично, пронизывая исследуемый образец, регистрируется преобразователем теплового потока. Соотношение поглощаемой и отражаемой составляющих теплового потока характеризует качество энергоэффективного покрытия.



T_1, T_2, T_3, T_4 - температуры
излучателя, основания,
поверхности пластины
преобразователей,
поверхности образца,
соответственно

$H_{обр}, H_{п}$ - высота
исследуемого образца и
полости, м

Рис. 1 Структура теплового блока установки для определения интегральных полусферических ТРХ в инфракрасной области спектра

В тепловом блоке приведенной конструкции может быть несколько факторов, влияющих на искажение теплового потока. К ним относятся геометрические размеры исследуемого образца, полости и ИТИ, степень черноты нанесенного покрытия, термическое сопротивление ПТП. Теплопередача от ИТИ к исследуемому образцу, в общем случае, имеет конвективную, кондуктивную и радиационную составляющие. Причем, именно радиационная составляющая теплообмена является информативным параметром, определяющим коэффициент поглощения. Радиационная составляющая зависит также от значений температуры ИТИ и поверхности исследуемого образца, а также угловых коэффициентов излучения полостного излучателя и влияния на них геометрических размеров ИТИ, то есть высоты и радиуса цилиндрического «стакана».

Расчетная оценка условий возникновения конвективной составляющей и экспериментальная проверка показали, что конвективной теплопередачей через воздух в полости практически можно пренебречь, поскольку ИТИ расположен над исследуемым образцом и имеет в рабочем режиме температуру более высокую, чем поверхность образца. Однако кондуктивная теплопередача через воздух полости приводит к краевым искажениям теплового поля на поверхности образца.

Подробный теоретический анализ факторов, влияющих на пространственное распределение радиационной и кондуктивной составляющих теплообмена, а также влияние термического сопротивления ПТП рассмотрены в [15].

Из полученных результатов следует, что при относительной высоте воздушной полости $h_{п} = \frac{H_{п}}{R_{п}} \leq 0,2$ в зоне, ограниченной относительным радиусом $\rho = \frac{R}{R_{п}} \leq 0,7$, тепловой поток от кондуктивной теплопередачи через воздух можно рассматривать как теплопередачу через бесконечную пластину с теплопроводностью воздуха:

$$q_{\text{КОНД}} = (T_1 - T_4) \times \frac{\lambda_B}{H_{\text{П}} - H_{\text{ОБР}}}, \quad (1)$$

где; λ_B – коэффициент теплопроводности воздуха.

Определение значения радиационной составляющей теплообмена базируется на известных [16] закономерностях радиационного теплообмена. В [15] показано, что локальный суммарный угловой коэффициент радиационного теплообмена поверхности образца с торцевой и боковой поверхностями ИТИ не зависит от места расположения на теплостоке и равен единице. При этом радиационная составляющая теплообмена на поверхности образца в замкнутом пространстве, образованном двумя диффузно отражающими поверхностями с различной температурой, согласно [16], может быть определена по формуле:

$$q_{\text{РАД}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ОБР}}} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{ИТИ}}} - 1 \right)}. \quad (2)$$

При этом измеряемая плотность теплового потока через образец и ПТП $q_{\text{ПТП}}$ равна сумме составляющих теплообмена:

$$q_{\text{ПТП}} = q_{\text{РАД}} + q_{\text{КОНД}}. \quad (3)$$

В разработанном приборе излучатель ИТИ 1 и основание 2 выполнены из высокотеплопроводного металла и образуют замкнутое пространство. Внутренняя поверхность излучателя (цилиндр и дно), обращенная к основанию, покрыта мелкими V-образными канавками и имеет чернящее покрытие, что обеспечивает коэффициент эмиссии (степень черноты) $\varepsilon_{\text{ИТИ}}$ не менее 0,95. Основание и излучатель имеют встроенные элементы, позволяющие поддерживать заданные значения температуры этих узлов – нагреватели, каналы для теплоносителя, преобразователи температуры и т.п. (на Рис. 1 эти элементы не показаны). На поверхности основания 2, обращенной к излучателю 1, расположена пластина термопреобразователей 3, в центральной зоне которой расположено несколько ПТП и преобразователей температуры поверхности, так, чтобы можно было над ними расположить одновременно несколько исследуемых образцов. В излучателе ИТИ расположен термоэлектрический преобразователь температуры поверхности излучателя.

Режимы измерения терморadiационных характеристик поверхностей исследуемых образцов реализуются при малых значениях разности температур ИТИ и исследуемого образца: $(T_1 - T_4) \leq 15 \text{ К}$. В этом случае коэффициент излучения поверхности исследуемого образца можно считать равным коэффициенту поглощения [16]. Поскольку металлические подложки напыляемых образцов терморегулирующих покрытий в длинноволновой области спектра являются непрозрачным для ИК-излучения, коэффициент отражения поверхности определяется из соотношения: $r = 1 - \varepsilon$.

Температуру T_4 непосредственно на поверхности исследуемого образца неудобно измерять контактным способом, так как это может привести к искажению радиационной составляющей теплообмена. Поэтому измеряют температуру с помощью спая термопары, расположенного на поверхности ПТП, а температуру поверхности исследуемого образца рассчитывают с учетом теплопроводности образца λ_4 по формуле:

$$T_4 = T_3 + q_{ПТП} \times \left(\Delta R_T + \frac{H_{ОБР}}{\lambda_4} \right), \quad (4)$$

где ΔR_T - дополнительное тепловое сопротивление между спаем термопары и образцом.

При измерениях для образца исследуемого материала 4 предварительно определяют теплопроводность λ_4 и толщину $H_{ОБР}$, а затем устанавливают на поверхность пластины термопреобразователей 3 с помощью тонкого слоя теплопроводной смазки. Устанавливают тепловые режимы прибора и после их стабилизации измеряют средние значения температуры и теплового потока. Значение температуры поверхности образца проводят по формуле (4), значение радиационной составляющей теплового потока находят на основании (1) и (3):

$$q_{РАД} = q_{ПТП} - (T_1 - T_4) \times \frac{\lambda_B}{H_{П} - H_{ОБР}}. \quad (5)$$

Значение коэффициента эмиссии поверхности образца рассчитывают по формуле, полученной из (2):

$$\varepsilon_{ОБР} = \frac{q_{РАД}}{\sigma(T_1^4 - T_4^4) - q_{РАД} \times \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{ИТИ}} - 1 \right)}, \quad (6)$$

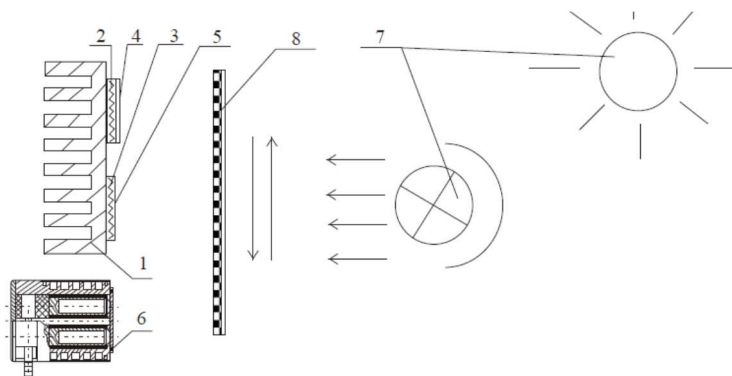
где F_1 / F_2 – отношение площадей поверхности излучателя и приемной поверхности теплового потока;

Средние значения $q_{ПТП}$, T_1 и T_3 , определяют непосредственно по результатам измерений во время эксперимента. Значения F_1 / F_2 , $\varepsilon_{ИТИ}$ и ΔR_T определяют при проектировании и калибровке прибора. Расстояние $H_{П}$ между поверхностями излучателя 2 и пластиной термопреобразователей 3 задано конструкцией прибора.

Поскольку прибор позволяет одновременно устанавливать несколько образцов, то проводят измерения плотности теплового потока и температуры поверхности каждого образца, а расчет коэффициентов эмиссии каждого образца проводят отдельно по формулам аналогичным (6). Одновременное исследование нескольких образцов позволяет быстро сравнивать между собой образцы при отработке технологии нанесения покрытий. В случае наличия эталонных образцов с известными терморadiационными характеристиками возможно сравнение с ними исследуемых образцов. Применение методики измерений с использованием двух эталонных образцов с контрастными значениями их коэффициентов излучения (первый образец – с покрытием из полированного металла $\varepsilon_{31} \approx 0,1$, а второй – из диэлектрика с матовой поверхностью $\varepsilon_{32} \approx 0,9$) позволяет компенсировать кондуктивную и конвективную составляющие теплообмена через воздушный зазор, в связи с чем отпадает необходимость учета кондуктивной теплопередачи через воздух.

4.2 Система и калориметрическая методика определения коэффициента поглощения солнечного излучения A_S .

Разработана методика и испытательный стенд на базе термоэлектрических биметаллических преобразователей теплового потока (ПТП) вида вспомогательной стенки [14] и абсолютного полостного приемника солнечного излучения, например, радиометра РАП-12СР [17]. Схема размещения приборов представлена на Рис. 2.



- 1 – термостатированное основание;
- 2, 3 – преобразователи теплового потока (ПТП);
- 4 – образец исследуемого покрытия;
- 5 – образец покрытия с известным коэффициентом поглощения солнечного излучения;
- 6 – абсолютный полостной приемник излучения;
- 7 – источник излучения, по спектру соответствующий излучению Солнца;
- 8 – подвижный экран с отражающим покрытием

Рис. 2. Схема размещения приборов при измерении коэффициента поглощения солнечного излучения A_S

На плоскую подложку из листового материала (металла или диэлектрика) наносят слой исследуемого покрытия с неизвестным коэффициентом поглощения A_{SX} .

При измерениях методом компарирования с эталонным образцом, устанавливают исследуемый образец с покрытием на поверхности плоского ПТП на слой высокотеплопроводной смазки. На второй идентичный ПТП устанавливают эталонный образец, имеющий покрытие с известным коэффициентом поглощения солнечного излучения A_{S0} и коэффициентом эмиссии ε_0 , например, черную пленку «Oracal». Поскольку теплофизические характеристики ПТП и подложек образцов известны, несложно вычислить суммарное тепловое сопротивление исследуемого образца с ПТП R и эталонного образца с ПТП R_0 . Также необходимо заранее определить коэффициент эмиссии исследуемого покрытия ε . Исследуемый и эталонный образцы вместе с ПТП размещают на массивном термостатируемом основании, изготовленном из высокотеплопроводного материала (Рис.2).

В случае отсутствия покрытия с известными параметрами дополнительно может быть применен радиометр РАП-12СР с известным коэффициентом поглощения A_P , позволяющий провести прямые измерения плотности потока излучения. Радиометр устанавливают таким образом, чтобы его входная диафрагма располагалась в той же плоскости, что и исследуемое покрытие. Источником излучения в данном исследовании может быть либо непосредственно Солнце, либо имитатор солнечного излучения, например, на базе ксеноновых ламп с температурой около 6000 К. Использование для экспозиции Солнца возможно только при ясной безоблачной погоде с обязательной коррекцией положения приемников излучения – ПТП и радиометра по отношению к движению Солнца по небосводу. Измерения проводят методом поочередной смены солнечного облучения и затенения с помощью подвижного экрана, регистрируют в каждом случае выходные сигналы ПТП и радиометра и рассчитывают значения плотности теплового потока солнечного излучения при экспозиции $Q_{OБЛ}$, $Q_{OБЛ0}$, $Q_{P-OБЛ}$

и затенении q_T , q_{T_0} , q_{P-T} . Расчет коэффициента поглощения солнечного излучения исследуемого образца A_{SX} производят по следующим зависимостям:

– в случае измерения методом компарирования и использования образцового покрытия:

$$A_{SX} = A_{So} \frac{(q_{OБЛ} - q_T) \cdot [1 + R \cdot (\alpha_K + 4\varepsilon\sigma T_T^3)]}{(q_{OБЛ_0} - q_{T_0}) \cdot [1 + R_o \cdot (\alpha_K + 4\varepsilon_o\sigma T_{T_0}^3)]}, \quad (7)$$

– в случае использования радиометра для измерения солнечного излучения:

$$A_{SX} = A_P \frac{(q_{OБЛ} - q_T) \cdot [1 + R \cdot (\alpha_K + 4\varepsilon\sigma T_T^3)]}{(q_{P-OБЛ} - q_{P-T})}, \quad (8)$$

где температура поверхности исследуемого и эталонного покрытия при затенении рассчитывается как $T_T = T_{CT} + R \cdot q_T$, $T_{T_0} = T_{CT} + R_o \cdot q_{T_0}$; $\alpha_K \approx 3 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м}^2)$ – коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене [4].

Следует отметить, что использование радиометра, в котором исключена конвективная составляющая теплообмена, значительно облегчает проведение эксперимента и последующие расчеты. Кроме того, в таком случае возможно проведение одновременного исследования двух образцов покрытия.

5. Технология нанесения многослойных покрытий на исследованные образцы

Многослойные покрытия для КПО были получены методом электронно-лучевого испарения в вакууме мишеней на основе Al и TiO₂. В качестве подложек были использованы пластины нержавеющей стали марки AISI 321 толщиной 175 мкм и размером 100×40 мм, поверхность которых перед вакуумным осаждением обезжировали. Слоистую структуру покрытий, состоящих из слоев Al и TiO₂, получали последовательным испарением мишеней различного химического состава за один технологический цикл, путем перемещения электронного пучка с одной мишени на другую. Толщину прослоек варьировали путем изменения режимов испарения и его продолжительности.

Перед осаждением покрытия подложку нагревали с помощью электронно-лучевой пушки; температуру подложки при ее разогреве и в процессе осаждения покрытия контролировали хромель-алюмелевой термопарой. Покрытие формировалось при температуре подложки $T_n = 400 \dots 450^\circ\text{C}$. Для обеспечения высокой адгезии покрытия и стальной подложки ее поверхность предварительно травил пучком ионов аргона с энергией 2...2,5 кэВ. Для повышения эффективности ионной очистки поверхности к стальной подложке было приложено отрицательное смещение 700 В.

Структуру и химический состав покрытий исследовали с использованием растрового микроскопа CamScan4, оснащенного системой локального химического анализа ENERGY 200. Образцы для исследования готовились по стандартной методике шлифовки и полировки с использованием оборудования фирмы Struers. Рентгендифракционные измерения проводили в геометрии скользящего пучка $\theta - 2\theta$ на дифрактометре ДРОН-4 в излучении CuK α .

6. Результаты исследований

Исследования проведены на образцах из стали без покрытия, стали с алюминиевым покрытием (Al), стали с покрытием из двуокиси титана (TiO₂) и стали с двухслойным покрытием – на стали слой Al, а на нем слой TiO₂. В Таблице представлены структурные характеристики покрытий (h_{TiO_2} , h_{Al} , h_S - толщины слоев покрытий TiO₂, Al и образца, нм), а также значения их терморadiационных характеристик. Видно, что соотношения A_S/ϵ нержавеющей стали и однослойных покрытий из Al и TiO₂ находятся в интервале значений от 2,46 (для TiO₂) до 3,6 (сталь AISI 321), что не удовлетворяет необходимым условиям.

Таблица: Экспериментально-расчетные значения ϵ и A_S исследуемых покрытий

| Материал | Сталь AISI 321 (h_S) | AISI 321+Al (h_{Al}) | AISI 321+TiO ₂ (h_{TiO_2}) | AISI 321+Al+TiO ₂ ($h_{Al}+h_{TiO_2}$) | |
|----------------|--------------------------|--------------------------|---|---|------------|
| Толщина | 175 μ m | 1300 nm | 800 nm | 900+700 nm | 300+500 nm |
| ϵ | 0,18 | 0,110 | 0,281 | 0,332 | 0,337 |
| A_S | 0,65 | 0,331 | 0,6905 | 0,5827 | 0,4804 |
| A_S/ϵ | 3,6 | 3,01 | 2,46 | 1,76 | 1,42 |

В случае двухслойных покрытий (AISI321+Al+TiO₂) коэффициент поглощения A_S ниже, чем у покрытия TiO₂. Изменяя соотношение толщин слоев Al и TiO₂, можно обеспечить снижение значения A_S/ϵ для двухслойного покрытия AISI 321+Al+TiO₂ до верхнего уровня диапазона допустимых значений 0,7...1,5; значение ϵ , при этом, сохраняется практически неизменным, при одновременном снижении величины A_S .

Расширенная неопределенность измерений коэффициента эмиссии находится в диапазоне 0,041...0,045, а расширенная неопределенность измерений коэффициента поглощения солнечного излучения – в диапазоне 0,030...0,049.

7. Заключение.

Установлено, что величиной, характеризующей эффективность терморегулирующего покрытия, является отношение коэффициента поглощения солнечного излучения к коэффициенту эмиссии A_S/ϵ . Предложены calorиметрические методы и разработаны относительно простые и недорогие средства измерения терморadiационных характеристик покрытий. Рассмотрена технология нанесения терморегулирующего покрытия слоистой структуры Al+TiO₂ на поверхность металлических раскрывающихся конструкций космического назначения; покрытие наносится последовательным осаждением Al и TiO₂ на подложку из нержавеющей стали путём испарения компонентов в вакууме электронно-лучевым методом. Проведены измерения терморadiационных характеристик покрытий Al+TiO₂ на нержавеющей стали и показано, что значение отношения A_S/ϵ для двухслойного покрытия существенно ниже аналогичного отношения, полученного для его отдельных компонентов. Показано, что изменением соотношения толщин слоев Al и TiO₂ двухслойного покрытия можно обеспечить снижение значения A_S/ϵ при неизменности коэффициента эмиссии ϵ .

Литература

1. NASA/TP-1999-209263. Multilayer Insulation. Material Guidelines. M.M. Finckenor. Marshall Space Flight Center, Alabama.
2. Gilmore D.G. Spacecraft Thermal Control Handbook. The Aerospace Press. 2002. 836p. https://www.amazon.com/Spacecraft-Thermal-Control-Handbook-Technologies/dp/188498911X#reader_188498911X.
3. Freeland R.E., G.D. Bilyeu, G.R. Veal. Development of flight hardware for a large, inflatable-deployable antenna experiment, IAF-95-1 S.O.
4. Lichodziejewski D., G. Veal, B. Derbès. Spiral wrapped aluminum laminate rigidization technology, AIAA 2002-1701
5. Paton B.E., L.M. Lobanov, V.S. Volkov. Metal transformable-volume structures for space engineering, Acta Astronautica, No. 110, pp.50–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.01.005>
6. Инструкция пользователя МКС (ISS RS Guide). Режим доступа: http://knts.tsniimash.ru/ru/src/CenterInfRes/iss_rs_guide.pdf
7. Фаворский О.Н., Я.С. Каданер. Вопросы теплообмена в космосе. – М. Высшая школа, 1967. – 248 с.
8. Zhang L., R.-M. Chen. TiO₂-Siloxane Thermal Control Coatings for Protection of Spacecraft Polymers. Chinese Journal of Aeronautics (2004), Vol.17, Issue 1, pp. 53-59. [doi:10.1016/S1000-9361\(11\)60203-3](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60203-3)
9. Халиманович В.И., В.А. Харламов, Р.А. Ермолаев, А.Е. Михеев, А.В. Гирн. Испытания лабораторных образцов терморегулирующих покрытий углепластиковых элементов космических аппаратов. Вестник СибГАУ, №3, 2009, с.110-113.
10. Михеев А.Е., А.В. Гирн, С.С. Ивасев, И.В. Евкин. Исследование свойств защитных покрытий для космических аппаратов. Вестник СибГАУ, № 3(49), 2013, с.217-224.
11. ISO 9050:2003 Glass in building. Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.
12. Падерин Л.Я., Б.В. Прусов, О.Д. Токарев. Установка для исследований интегральной полусферической излучательной способности теплозащитных материалов и терморегулирующих покрытий. Ученые записки ЦАГИ, XLII(1), 2011 с.53-61.
13. Черепанов В.Я. Разработка методов и средств метрологического обеспечения измерений коэффициентов теплового излучения материалов. Интерэкспо Гео-Сибирь, Т. 6, 2005. <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metodov-i-sredstv-metrologicheskogo-obespecheniya-izmereniy-koeffitsientov-teplovogo-izlucheniya-materialov>.
14. Грищенко Т.Г. и др. Теплометрия: теория, метрология, практика. Монография в 3-х книгах. Кн. 1. Методы измерения теплового потока. Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2017, 438 с. <http://er.nau.edu.ua:8080/handle/NAU/27263>.
15. Ковтун С.І., Л.В. Декуша, Л.Й. Воробйов. Аналізування впливу параметрів випромінювача на передавання одиниці вимірювання теплового потоку. Slovak international scientific journal, Vol.1, №16, 2018, с.51-54.
16. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М.: Атомиздат, 1979, 212с.
17. Басок Б. І., Л. Й. Воробйов, Л. В. Декуша та ін. Прилад для дослідження надходження сонячної енергії на похилий геліоколектор. Промышленная теплотехника, Т. 35, № 5, 2013, с.78-87.