

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ КЛА

Александр Александрович КУПРЮХИН родился в 1985 г. в Московской области. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области тепло- и массообмена и катализа в химически активных пограничных слоях. Автор семи научных работ. E-mail:pn280837@yandex.ru

Aleksandr A. KUPRUKHIN, was born in 1985, in the Moscow region. He is a Postgraduate Student at the MAI. His major research interests are in heat- and mass exchange in chemically active boundary layers. He has published 7 technical papers. E-mail:pn280837@yandex.ru

Петр Васильевич НИКИТИН родился в 1937 г. в Могилевской области. Профессор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области термодинамики, тепло- и массообмена, тепловой защиты, гетерогенных потоков, разнофункциональных покрытий, теплозащитных материалов. Автор 210 научных работ. E-mail:pn280837@yandex.ru

Peter V. NIKITIN, D.Sci., was born in 1937 in the Mogilev region. He is a Professor at the MAI. His major research interests are in thermodynamics, heat- and mass exchange, heat shield, heterogeneous streams, varifunctional coatings, heat-shielding materials. He has published 210 technical papers. E-mail:pn280837@yandex.ru

Евгений Викторович СОТНИК родился в 1945 г. в Московской области. Заместитель декана МАИ. Основные научные интересы — в области теплопередачи, конвективно-лучистого теплообмена, экспериментального исследования ТЗМ. Автор 60 научных работ. E-mail:pn280837@yandex.ru

Eugenie V. SOTNIK, was born in 1945, in the Moscow region. He is a Deputy Dean at the MAI. His major research interests are in heat transfer, convective-radiant heat exchange, experimental research of heat shield materials. He has published 210 technical papers. E-mail:pn280837@yandex.ru

В статье излагается метод экспериментального определения каталитических и излучательных свойств перспективных материалов тепловой защиты космических летательных аппаратов планирующего класса. Метод разработан с целью использования на высокотемпературных газодинамических стендах, воспроизводящих натурные тепловые параметры при полете КЛА в атмосфере Земли и других планет. Проведен анализ влияния каталитических и излучательных свойств на теплообмен на поверхности КЛА. Предложены алгоритмы экспериментального определения этих свойств. Важность изложенных в работе результатов подкрепляется тем фактом, что каталитические и излучательные свойства оказываются единственным фактором, способным уменьшить подвод тепла к поверхности космического аппарата при полете в плотных слоях атмосферы с гиперзвуковой скоростью.

In article the method of experimental definition catalytical and radiating properties of perspective materials of heat shield of space flying apparatus (SFA) of the planning class is stated. The method is developed with the purpose of use on high-temperature gasdynamics stands reproducing natural thermal parameters at flight of SFA in an atmosphere of the Earth and other planets. The analysis of influence catalytical and radiating properties on heat exchange on surface SFA is carried out. Algorithms of experimental definition of these properties are offered. Importance of the results stated in work is supported with that fact, that catalytical and radiating properties appear the unique factor, capable to reduce a supply of heat to a surface of a space vehicle at flight in dense layers of an atmosphere with hypersonic speed.

Ключевые слова: химически-активный пограничный слой, каталитические свойства, излучательные свойства, гетерогенные реакции, диссоциированный поток, каталитическая активность поверхности, константа скорости рекомбинации.

Key words: chemically-active boundary layer, catalytical properties, radiating properties, heterogeneous reactions, dissociated flow, catalytical activity of a surface, constant of recombination speed.

Введение

Каталитические и излучательные свойства твердых материалов неразрывно связаны с компонен-

тным составом и физико-химическими характеристиками поверхностного слоя. Эти свойства могут в значительной степени изменяться в результате на-

грева поверхности, например, при полете космических летательных аппаратов (КЛА) в атмосфере с гиперзвуковой скоростью. Кроме того, на каталитические и излучательные свойства также оказывают сильное влияние процессы химического гетерогенного взаимодействия между материалом и активными компонентами набегающего газового потока. В силу этого простой набор отдельных химических элементов и соединений в составе композиции теплозащитного материала (ТЗМ) не дает гарантии интегрального воспроизведения их каталитических и излучательных свойств. В этом смысле закон аддитивности не выполняется. Поэтому проведение специальных теоретических и экспериментальных исследований по изучению каталитических и излучательных свойств ТЗМ и покрытий с целью получения необходимых характеристик является одной из актуальных задач.

Для неразрушаемой тепловой защиты многоразовых КЛА каталитические свойства поверхности ТЗМ оказываются единственным фактором, способным уменьшить подвод тепла к поверхности. В свою очередь, степень черноты поверхности ТЗМ и его максимально допустимая рабочая температура являются основным фактором, способным интенсифицировать отвод в окружающее пространство подведенной к поверхности КЛА теплоты [1].

Таким образом, научное прогнозирование каталитических и излучательных свойств с целью их улучшения, а также разработка методов экспериментального определения этих свойств является актуальной задачей ракетно-космической техники, например, для разработки аэрокосмических систем нового поколения.

Ниже приводятся алгоритмы и результаты экспериментальных исследований, выполненных в этом направлении в МАИ. В качестве штатного ТЗМ использовался углерод-углеродный композиционный материал с различными защитными термостойкими покрытиями, сформированными на его поверхности низкотемпературным газодинамическим методом (НТГДМ) [2, 3].

1. Влияние каталитической активности поверхности ТЗМ на теплообмен в воздушном диссоциированном потоке

При входе в атмосферу Земли КЛА планирующего класса на достаточно больших высотах 40—90 км атомы кислорода и азота, образовавшиеся в пограничном слое, не успевают рекомбинировать в молекулы и достигают поверхности аппарата. В случае если материал поверхности КЛА является катализатором реакции рекомбинации атомов (высокая каталитическая активность), то химическая

энергия, выделившаяся в объеме пограничного слоя в ходе этого процесса, передается в конструкцию аппарата, тем самым, значительно увеличивая его температуру поверхности. Если материал поверхности КЛА является ингибитором, то реакция рекомбинации атомов не происходит (низкая каталитическая активность), а атомы кислорода и азота сносятся вниз по потоку. В результате химическая энергия на поверхности не выделяется и дополнительный нагрев конструкции КЛА не возникает.

При скоростях полета $V = 6 \div 8$ км/с применение материалов с малой или нулевой каталитической активностью существенно (до трех раз) снижает тепловые потоки в стенку (рис. 1) и, соответственно, уменьшает на 300—400° температуру поверхности тепловой защиты.

Реализация возможностей ТЗМ с низкой каталитической активностью поверхности связано также с качеством траектории входа в атмосферу космического аппарата и его характерными размерами [1].

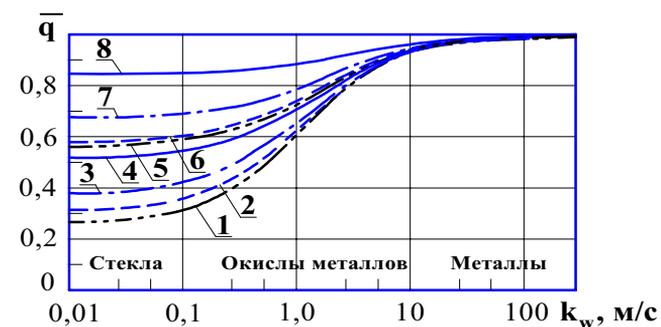


Рис. 1. Влияние каталитической активности поверхности k_w на тепловой поток в стенку для разных скоростей полета КЛА V_∞ на высоте 75 км:
 1 — $V_\infty = 7,8$ км/с; 2 — $V_\infty = 6,6$ км/с;
 3 — $V_\infty = 6,0$ км/с; 4 — $V_\infty = 4,8$ км/с;
 5 — $V_\infty = 4,2$ км/с; 6 — $V_\infty = 3,6$ км/с;
 7 — $V_\infty = 3,0$ км/с; 8 — $V_\infty = 2,4$ км/с

2. Особенности постановки экспериментальных исследований каталитической активности ТЗМ

Каталитическая активность применительно к реакциям рекомбинации атомов кислорода и азота характеризуется двумя параметрами. Один из них — константа скорости гетерогенной рекомбинации K_w , второй — коэффициент вероятности реакции рекомбинации γ .

Безразмерный коэффициент γ характеризует отношение прорекомбинировавших атомов к полному числу атомов, достигших поверхности. Вероятность рекомбинации изменяется в пределах $0 < \gamma < 1$.

Связь между указанными параметрами K_w и γ определяется следующим соотношением:

$$K_w = \gamma \left(\frac{RT_w}{2\pi M_A} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.1)$$

где M_A — мольная масса рекомбинирующего атома.

Формула (2.1) используется в некоторых методах определения K_w , поскольку коэффициент вероятности реакции рекомбинации γ поддается расчету.

В экспериментальной практике для определения каталитических свойств материалов (K_w) используется несколько методов. Однако, как оказалось, применительно к тепловой защите КЛА наиболее приемлемым является предлагаемый в данной работе калориметрический метод. Метод базируется на сопоставлении результатов экспериментальных исследований скорости гетерогенной рекомбинации K_w на материале с неизвестной каталитической активностью с результатами измерений теплообмена на материале с известной каталитической активностью. При этом в эксперименте используются неохлаждаемые калориметры регулярного режима [4]. Однако при постановке таких экспериментов необходимо учитывать ряд особенностей. Например, установлено [5], что процессы гетерогенной каталитической рекомбинации сопровождаются процессами адсорбции и десорбции, диффузии и рекомбинации атомов в порах и трещинах, процессами возбуждения электронных уровней на поверхности, а также промежуточными обменными реакциями. Поэтому теплоприемные элементы используемых в эксперименте калориметрических датчиков должны иметь высокий класс обработки. Кроме того, поскольку в ряде калориметров на поверхности теплоприемных элементов наносятся тонкие термостойкие покрытия, то поверхность таких покрытий должна быть шлифованной, а покрытия не должны иметь пористой структуры.

Относительно промежуточных обменных реакций нужно иметь в виду следующее. Установлено, что эти газофазные (гомогенные) реакции сильно влияют на результирующую скорость поверхностной рекомбинации атомов. Поэтому для воздуха нельзя использовать результаты исследований каталитической активности, полученные в потоках азота и кислорода в отдельности, в виде их суммы [6, 7].

Так, например, каталитическая рекомбинация атомов кислорода на поверхности материала в виде

$O + O \rightarrow \text{поверхность} \rightarrow O_2$ приводит в диссоциированном воздухе к обменным гомогенным реакциям вида



и, далее, $NO + N \rightarrow N_2 + O + 3,3 \text{ эВ}$.

Просуммировав правые и левые части уравнений реакций, получим



Из проведенного анализа следует, что гетерогенная реакция рекомбинации атомов кислорода, вызывает появление обменных реакций между кислородом и азотом. Это, в свою очередь, инициирует возникновение ускоренной рекомбинации атомов азота. В этой связи в экспериментальных исследованиях диссоциированный воздух необходимо рассматривать как единый газ, для которого существует некая эффективная (суммарная) константа скорости рекомбинации атомов кислорода и азота $K_{w \text{эф}}$. Последняя должна определяться по результатам измерений тепловых потоков к испытуемым моделям (калориметрический метод).

В общем случае эффективная константа скорости поверхностной рекомбинации $K_{w \text{эф}}$ в потоке диссоциированного воздуха в химической кинетике определена как

$$K_{w \text{эф}} = A \cdot \exp \left(\frac{\Delta G^0}{RT_w} \right), \quad (2.2)$$

где ΔG^0 — изменение термодинамического потенциала одного моля диссоциированного воздуха до и после рекомбинации; R — газовая постоянная смеси многокомпонентного воздуха; T_w — температура поверхности.

Однако использование уравнения (2.2) в эксперименте вызывает ряд непреодолимых трудностей.

Экспериментально можно оценить влияние каталитичности материалов на реакцию рекомбинации азота. Это влияние на результирующий тепловой поток может быть определено при использовании в эксперименте потоков воздуха с различной степенью диссоциации азота при практически полной диссоциации кислорода (рис. 2).

Из приведенных на рис. 2 данных следует, что такие два варианта можно реализовать, например, при давлении $p = 10^5$ Па и температурах воздуха в пограничном слое $T = 5000$ К и $T = 8000$ К. В первом варианте при полной диссоциации кислорода массовая концентрация атомов азота составляет $\sim 0,03$. Во втором варианте — около 0,65. При

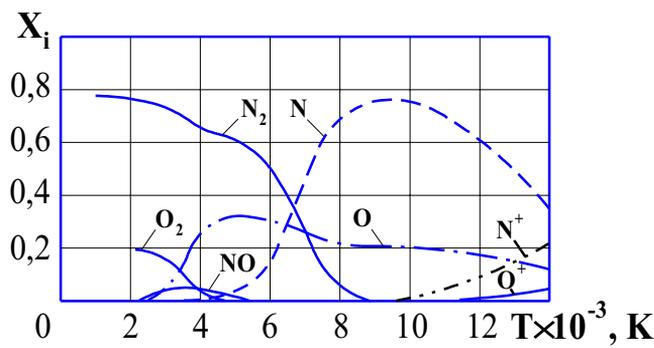


Рис. 2. Равновесный химический состав высокотемпературного воздуха при атмосферном давлении в зависимости от температуры (мольные доли $X_i = M_i/M_{см}$; M_i и $M_{см}$ — число молей i -го компонента и смеси (воздуха) соответственно)

Этот расчет массовой концентрации атомов азота C при взятых из рис. 2 мольных долях X_i производился по формуле

$$C_i = X_i \cdot \frac{\mu_i}{\mu_{см}}. \quad (2.3)$$

Кроме указанных, для исключения (снижения) влияния обменных реакций между азотом и кислородом должны быть приняты меры по приближению условий в пограничном слое на испытуемых моделях близкому к замороженному. Это можно достигнуть путем снижения уровня давления на модели до $10^3 - 5 \cdot 10^3$ Па или уменьшения размеров модели. В ряде экспериментов для учета (исключения) влияния гетерогенных реакций другого типа (например, окисления компонентов ТЗМ) экспериментальные исследования целесообразно проводить не только на умеренно горячих ($T_w = 1700 \div 2000$ К), но и на холодных поверхностях ($T_w < 600$ К).

При такой постановке эксперимента полученные значения $K_{w\text{эф}}$ будут приближаться к реальным, характеризующим непосредственно испытуемый материал. Влияние же обменных реакций можно оценить численным расчетом для условий эксперимента.

Таким образом, при постановке экспериментальных исследований по определению каталитической активности ТЗМ необходимо на стенде воспроизводить условия, приближающиеся к натурным (траекторным). При этом особо пристальное внимание следует обратить на получение в набегающем на модель потоке компонентного состава чистого (атмосферного) высокотемпературного воздуха. Присутствие посторонних примесей в потоке (например, продукта эрозии электродов плазмотрона) является совершенно не допустимым фактом.

В этой связи все экспериментальные исследования необходимо проводить на безэлектродных, высокочастотных плазмотронах.

3. Некоторые аспекты расчета теплообмена на каталитически активной поверхности

Анализ влияния на теплообмен каталитической активности поверхности строился, главным образом, на концепции [8] равенства нулю концентрации атомов на поверхности. Однако эта концепция не учитывала процессы каталитической абсорбции, для которых, как показано в ряде работ [6], скорость реакции абсорбции пропорциональна плотности и массовой концентрации i -й компоненты у поверхности, т.е. $(C_{i,w} \cdot \rho_{i,w})^m$. Кроме того, эта концепция не учитывала также возможность реакции диссоциации молекул на поверхности. В дальнейшем было установлено, что указанными процессами можно пренебрегать в случае высокой активации поверхности и низких уровнях температур, $T_w \leq 2000$ К. В связи с этим для экспериментального определения каталитических свойств новых типов ТЗМ появилась необходимость проанализировать некоторые аспекты влияния на тепло- и массообмен каталитической активности поверхности.

Как известно, диффузионный проток массы атомов g_i к поверхности в пограничном слое описывается законом Фика в виде

$$g_i = \rho_w \cdot D_i \cdot \left(\frac{\partial C_i}{\partial y} \right)_w. \quad (3.1)$$

Тогда, согласно закону сохранения массы, имеем

$$g_i = \rho_w \cdot D_i \cdot \left(\frac{\partial C_i}{\partial y} \right)_w = K_w \cdot (C_{i,w} \rho_{i,w})^m, \quad (3.2)$$

где K_w — скорость рекомбинации атомов. По оценкам ряда работ, порядок реакции m изменяется в пределах $1 \leq m \leq 2$. При умеренных температурах поверхности можно принять $m = 1$.

Выражение (3.2) является граничным условием для решения уравнения неразрывности потока. Из него следует, что диффузионный поток атомов к стенке может иметь место при $K_w \rightarrow \infty$, несмотря на то, что вследствие процесса гетерогенной рекомбинации массовая концентрация атомов на стенке $C_{i,w} \rightarrow 0$.

При использовании (3.2) возникают трудности в определении массовой концентрации атомов на каталитически активной поверхности. Поэтому приходится решать систему нелинейных дифферен-

циальных уравнений пограничного слоя с введением новых переменных в форме преобразования Дородницина—Лиза. Подобное решение проведено в работах [9, 10].

Далее, если учесть, что при умеренной температуре поверхности каталитическую реакцию рекомбинации можно считать реакцией первого порядка ($m = 1$ в (3.2)), то решение задачи пограничного слоя дает возможность представить безразмерную массовую концентрацию атомов на стенке в виде

$$\frac{C_{i,w}}{C_{i,e}} = \frac{1}{\left(\frac{\mu_0 \rho_0}{2\beta}\right)^{1/2} \cdot \frac{K_w}{0,47 Sc_w^{1/3} \cdot \rho_w \cdot D_{i,j}} + 1}, \quad (3.3)$$

где $C_{i,e}$ — массовая концентрация атомов на внешней границе пограничного слоя, индекс «0» означает, что данный параметр берется при температуре торможения; K_w — скорость рекомбинации атомов; $Sc_w = Pr_w / Le_w$; β — градиент скорости в передней критической точке,

$$\beta = \frac{C}{R_0} \sqrt{2 \frac{p_0}{\rho_0}}, \quad (3.4)$$

где $C = \sqrt{1 - \frac{p_H}{p_0}}$; R_0 — радиус притупления КЛА.

Из выражения (3.3) следует, что при абсолютной каталитической активности поверхности, т.е. $K_w \rightarrow \infty$, безразмерная концентрация атомов на поверхности стремится к нулю, т.е. $C_{i,w}/C_{i,e} \rightarrow 0$. При нулевой каталитической активности, $K_w \rightarrow 0$, эта концентрация стремится к единице: $C_{i,w}/C_{i,e} \rightarrow 1$.

Перейдем далее к анализу теплообмена на стенке. Ранее показано, что теплообмен в химически активном пограничном слое определяется, главным образом, двумя процессами: молекулярной теплопроводностью и процессом рекомбинации атомов, продиффундировавших на стенку из объема пограничного слоя. Плотность теплового потока для первого процесса обозначим $q_{0,\lambda}$, для второго — $q_{0,рек}$. В таком случае суммарный тепловой поток в стенку можно представить в виде

$$q_{0,\Sigma} = q_{0,\lambda} + q_{0,рек}. \quad (3.5)$$

Выражение для расчета плотности теплового потока в передней критической точке, обусловлен-

ного молекулярной теплопроводностью $q_{0,\lambda}$ получено в теории теплообмена и имеет вид

$$q_{0,\lambda} = 0,665 (\beta \cdot \rho_0 \cdot \mu_0)^{1/2} Pr_w^{-2/3} (I_0 - I_w), \quad (3.6)$$

где ρ_0 — плотность воздуха при температуре и давлении торможения; μ_0 — коэффициент динамической вязкости воздуха при температуре и давлении торможения; Pr — критерий Прандтля; I_0 — энтальпия торможения потока; I_w — энтальпия воздуха при температуре стенки.

Остановимся несколько подробнее на выводе выражения для расчета плотности теплового потока $q_{0,рек}$ в передней критической точке, обусловленного рекомбинацией атомов. Понятно, что плотность теплового потока $q_{0,рек}$ определяется величиной диффузионного потока атомов к поверхности g_i , а также удельной теплотой рекомбинации атомов h_i^0 , т.е.:

$$q_{0,рек} = g_i \cdot h_i^0 \quad (3.7)$$

или, учитывая (3.1), получим

$$q_{0,рек} = K_w \cdot C_{i,w} \cdot \rho_w \cdot h_i^0. \quad (3.8)$$

Согласно (3.3) окончательно получим

$$q_{0,рек} = 0,665 (\beta \cdot \mu_0 \cdot \rho_0)^{1/2} \cdot Sc_w^{-2/3} \cdot h_i^0 \cdot C_{i,e} \cdot \varphi (I_0 - I_w), \quad (3.9)$$

где $C_{i,e}$ — массовая концентрация атомов на внешней границе пограничного слоя; φ — коэффициент,

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,665 Sc_w^{-2/3} \cdot (\beta \cdot \mu_0 \cdot \rho_0)^{1/2}}{\rho_w \cdot K_w}}. \quad (3.10)$$

Здесь $Sc_w = \frac{Pr_w}{Le_w} = \frac{\mu_w}{\rho_w D_{i,w}}$ — критерий Шмита.

В формуле (3.9) влияние каталитической активности поверхности отражено в скорости рекомбинации K_w . Если $K_w \rightarrow \infty$, $\varphi \rightarrow 1$, при $K_w \rightarrow 0$ $\varphi \rightarrow 0$, следовательно, $q_{0,рек} \rightarrow 0$.

В таком случае, используя уравнения (3.5), (3.6) и (3.11) и проведя соответствующие преобразования, получаем выражение для расчета суммарного теплового потока в передней критической точке КЛА с учетом влияния на теплообмен каталитической активности поверхности ТЗМ:

$$q_{0,\Sigma} = 0,665(\beta \cdot \mu_0 \cdot \rho_0)^{1/2} Pr_w^{-2/3} \times \left(1 + \varphi \sum_{i=1}^n C_{i,e} Le_w^{-2/3} \frac{h_i^0}{I_0 - I_w} \right) (I_0 - I_w). \quad (3.11)$$

Соотношения (3.10) и (3.11) в дальнейшем будут использованы при составлении алгоритма экспериментального определения K_w .

4. Алгоритм постановки эксперимента по определению K_w

Алгоритм проведения эксперимента по определению K_w сводится к следующему:

1) изготавливаются два идентичных калориметра регулярного режима сферической формы. Поверхность теплоприемного элемента одного из них покрыта с использованием НТГДМ-технологии [2] тонким слоем теплозащитного покрытия, каталитическую активность которого K_w необходимо определить. Теплоприемный элемент второго калориметра изготавливается из меди, с абсолютной, как известно, каталитической активностью, $K_w \rightarrow \infty$;

2) проводятся диагностические исследования параметров сверхзвукового высокотемпературного потока, создаваемого высокочастотным плазмотроном, при истечении в вакуум. В результате диагностических измерений определяется изменение всех необходимых параметров по продольной координате потока: энтальпии I_0 и давления p_0 торможения, скорости V_∞ , а также статические давления p и др.

При этом форма и размеры всех используемых диагностических зондов должна соответствовать форме и размерам калориметрических датчиков;

3) выбирается поперечное сечение сверхзвукового потока, в котором по предварительным оценкам реализуется при обтекании калориметров химически активный «замороженный» пограничный слой;

4) численными методами определяется массовая концентрация атомов $C_{i,e}$ кислорода и азота на внешней границе пограничного слоя;

5) в выбранном сечении потока устанавливаются по очереди два изготовленных ранее калориметра и определяются тепловые потоки в калориметр с неизвестной каталитической активностью K_w

и известной абсолютной каталитической активностью, $K_w \rightarrow \infty$, т.е. определяются значения плотностей тепловых потоков q_{K_w} и $q_{K_w \rightarrow \infty}$;

6) используется соотношение (3.11), модифицированное для калориметра с $K_w \rightarrow \infty$, для которого $\varphi = 1$, т.е.

$$q_{K_w \rightarrow \infty} = 0,665(\beta \cdot \mu_0 \cdot \rho_0)^{1/2} Pr_w^{-2/3} \times \left(1 + \sum_{i=1}^n C_{i,e} Le_w^{-2/3} \frac{h_i^0}{(I_0 - I_w)} \right) (I_0 - I_w).$$

При известном $q_{K_w \rightarrow \infty}$ и полученным в результате диагностики параметрам потока определяется

комплекс $A = 0,665(\beta \cdot \mu_0 \cdot \rho_0)^{1/2} Pr_w^{-2/3} (I_0 - I_w)$, а также рассчитывается комплекс параметров

$$B = \left(1 + \sum_{i=1}^n C_{i,e} \cdot Le_w^{-2/3} \frac{h_i^0}{(I_0 - I_w)} \right);$$

7) используется соотношение (3.11) для второго калориметра с покрытием. При известном q_{K_w} и определенных комплексах A и B рассчитывается значение коэффициента φ ;

8) по известному значению φ с использованием соотношения (3.10) рассчитывается значение искомой скорости рекомбинации K_w ;

9) эксперимент по определению K_w данного теплозащитного покрытия следует повторить несколько раз с целью определения погрешности.

5. Определение излучательных свойств теплозащитных материалов при интенсивном нагреве

Интегральная излучательная способность ϵ_w (степень черноты поверхности) теплозащитного материала является одним из параметров, обеспечивающих условие теплового баланса на внешней поверхности космических летательных аппаратов многоразового использования. Кроме того, уровень ϵ_w является индикатором всех физико-химических процессов, протекающих на поверхности ТЗМ.

Как известно, комплекс излучательных свойств включает монохроматическую (спектральную) ϵ_λ и интегральную ϵ_w степени черноты поверхности. Для определения этих параметров в ходе испытания ТЗМ в высокоэнтальпийных газовых потоках используются основные теоретические положения

теплового излучения тел, а также методы оптической пирометрии [11].

Из определения цветовой температуры, согласно закону Вина, имеем [12, 13]

$$T_{W,ЦВ} = \left[\frac{1}{\lambda_1 \cdot T_{W,\lambda_1}} - \frac{1}{\lambda_2 \cdot T_{W,\lambda_2}} \right] \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)^{-1}. \quad (5.1)$$

В таком случае истинная температура поверхности может быть определена по известной цветовой температуре по формуле

$$T_W = \frac{1}{\left[T_{W,ЦВ} + \frac{1}{C_2} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)^{-1} \right]}. \quad (5.2)$$

Кроме того, как известно из теории теплового излучения тел, монохроматическая степень черноты поверхности серого тела представляется в виде

$$\varepsilon_{\lambda,i} = \frac{\exp \frac{C_2}{\lambda_i \cdot T_W} - 1}{\exp \frac{C_2}{\lambda_i \cdot T_{\lambda_i}} - 1}, \quad (5.3)$$

где C_2 — коэффициент излучения в законе Планка.

В свою очередь, интегральная степень черноты поверхности согласно закону Стефана—Больцмана может быть представлена в виде

$$\varepsilon_W = \left(\frac{T_{W,R}}{T_W} \right)^4. \quad (5.4)$$

Таким образом, в основу метода определения излучательных свойств теплозащитных материалов при интенсивном нагреве положено использование в эксперименте соотношений (5.1)—(5.4) и соответствующих параметров, полученных в эксперименте.

Метод экспериментального определения излучательных свойств ТЗМ базируется на измерении монохроматических яркостных температур поверхности $T_{w,\lambda}$ датчиком Козырева [14] как минимум на двух длинах волн λ_1 и λ_2 , а также радиационной $T_{w,R}$ и истинной T_w температуры поверхности исследуемого ТЗМ.

Далее принимается допущение, что монохроматическая излучательная способность материала слабо изменяется в выбранном диапазоне длин волн λ_1 и λ_2 , т. е. $\varepsilon_{\lambda_1} \approx \varepsilon_{\lambda_2} \approx \varepsilon_\lambda$.

Для того чтобы это допущение выполнялось в эксперименте, измерения яркостных температур производятся на нескольких длинах волн λ_i . Такой прием позволяет выбрать для эксперимента такой интервал длин волн, где справедливо допущение о слабом изменении монохроматической степени черноты ε_λ . Тогда, используя экспериментальные данные измеренных температур T_{w,λ_i} , $T_{w,R}$ и T_w , по проведенным выше зависимостям рассчитываются искомые излучательные способности исследуемого ТЗМ — спектральная и интегральная.

6. Особенности экспериментального определения излучательных свойств теплозащитных материалов*

При реализации данного алгоритма в эксперименте необходимо иметь в виду, что при испытаниях теплозащитных материалов в высокоэнтальпийных газовых потоках возникает трудность, связанная с наличием сильной искусственной «подсветки» поверхности материала со стороны электродугового подогревателя газа (плазмотрона) или другого источника лучистого нагрева.

Если не сделать поправку на учет «подсветки» поверхности, то это вызывает значительную погрешность при определении яркостной и радиационной температур поверхности.

Последнее, в свою очередь, приведет к серии ошибок при определении истинной температуры поверхности T_w , а также излучательных монохроматических ε_λ и интегральных ε_W свойств.

Степень влияния искусственной «подсветки» зависит как от интенсивности самой «подсветки», так и от поглощательных свойств поверхности и уровня измеряемых температур.

Методические эксперименты, проведенные на газодинамическом стенде, показали, что яркостные температуры поверхности при наличии «подсветки» для разных длин волн заметно отличаются друг от друга.

Например, на длине волны $\lambda_1 = 0,633$ мкм яркостная температура поверхности $T_{\lambda_1} = 2340$ К; на

* Экспериментальная часть работы проведена с.н.с. В.С. Кондратьевым, в.н.с., д.т.н. П.Д. Лебедевым, с.н.с. И.Ф.Семеновым, с.н.с. Е.В.Сотником, вед. инж. О.М. Башировым, техником высшей квалификации С.Д. Смирновым.

$\lambda_2 = 0,795 \text{ мкм} - T_{\lambda_2} = 2030 \text{ К}$. И, наконец, на длине волны $\lambda_1 = 1,15 \text{ мкм} - T_{\lambda_3} = 1450 \text{ К}$. Для интегральной излучательной способности ϵ_W в диапазоне длин волн $\lambda = 0,2 \div 3,0 \text{ мкм}$ радиационная, «кажущаяся температура» поверхности с учетом «подсветки» составила $T_{w,p} = 1120 \text{ К}$.

С использованием представленных выше экспериментальных данных проведены параметрические расчеты, позволившие оценить влияние «подсветки» на величину измеряемой яркостной температуры поверхности для двух длин волн. Результаты оценочных расчетов приведены на рис. 3.

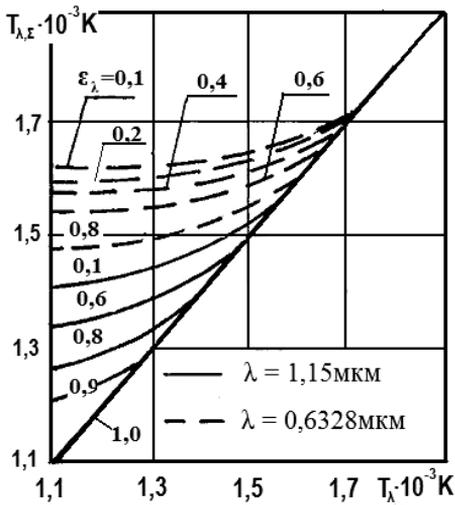


Рис. 3. Величина истинной (без влияния «подсветки») цветовой температуры T_λ в зависимости от измеренной суммарной температуры с учетом «подсветки» $T_{\lambda\Sigma}$ для разных значений монохроматической степени черноты поверхности образца ϵ_λ

Метод учета влияния «подсветки» на результаты измерений строился на сложении интенсивности излучения нагретой поверхности и интенсивности излучения «подсветки», отраженной от этой поверхности. В таком случае суммарная яркость свечения нагретой поверхности может быть представлена в виде

$$B_\lambda^\Sigma = B_{W,\lambda} + (1 - \epsilon_{W,\lambda}) \cdot R \cdot B_{\lambda_0}, \quad (6.1)$$

где R — параметр, определяемый формой индикаторы рассеяния. Определяется соотношением между телесными углами падающего, отраженного излучения и углом визирования (ракурсом); B_λ^Σ — яркость суммарного (с учетом «подсветки») излучения поверхности; $B_{W,\lambda}$ — яркость истинного из-

лучения поверхности при температуре T_W ; B_{λ_0} — яркость, возникающая от падающего на поверхность излучения от источника «подсветки» — плазмотрона.

Выражение (6.1) позволяет получить расчетные формулы для оценки излучательных свойств нагретой поверхности ϵ_λ и ϵ_W в виде

$$\epsilon_\lambda = 1 - \frac{B_\lambda^\Sigma - B_{W,\lambda}}{R \cdot B_{\lambda_0}}; \quad (6.2)$$

$$\epsilon_W = 1 - \frac{B_\Sigma - B_W}{R \cdot B_0}. \quad (6.3)$$

Таким образом, используя (6.2) и (6.3), при известных значениях входящих в них параметров просто определить искомые излучательные свойства нагретой поверхности ТЗМ при наличии «подсветки».

Для определения необходимых параметров проведены специальные экспериментальные исследования для измерения яркостей монохроматического излучения B_λ и плотностей потока излучения E_i .

В ходе эксперимента измеряются следующие параметры:

B_{λ_0} — яркость падающего на поверхность исследуемого образца излучения от источника «подсветки»;

$B_{W,\lambda}$ — истинная яркость излучения поверхности образца, нагретой до температуры T_W ;

B_λ^Σ — суммарная яркость излучения образца с учетом «подсветки».

Расчет значений всех указанных яркостей излучения B_λ и плотностей потока излучения E_i проводился на основе измерений яркостных цветковых температур T_{W,λ_i} и радиационных температур поверхности образца $T_{W,p}$.

Для определения реальных (без подсветки) значений яркостных температур поверхности образца в эксперименте использовались два подхода. В первом из них устранение влияния «подсветки» на результаты измерений осуществлялось путем использования обтюратора (рис. 4), производящего сканирование с периодом колебания не более 0,035 с.

Применение сканирующего обтюратора с дискретным циклом измерения не приводило к замет-



Рис. 4. Сканирующий обтюратор

ному изменению конвективного теплового потока, в стенку образца. Кроме того, кратковременная деформация обтюратором пристеночного слоя носила неинтенсивный характер, что не сказывалось на величине яркостной температуры.

При втором подходе учет влияния «подсветки» на результаты измерений осуществляется путем проведения серии дополнительных методических измерений с использованием зеркальных, диффузных и прозрачных моделей.

При измерениях яркости излучения «подсветки» принималось допущение о равенстве параметров индикатрисы рассеяния излучения, падающего на поверхность материала и на эталон диффузного отражателя. Достоверность такого допущения обусловлена тем обстоятельством, что поверхность ТЗМ УУКМ с термостойкими покрытиями при высоких температурах ($T_w > 1800$ К) является диффузными отражателями или достаточно близкими к диффузным. Это условие хорошо выполняется в пределах тех углов визирования, которые использовались в эксперименте.

Параметр индикатрисы рассеяния R определялся исходя из геометрических соотношений образца и источника излучения, а также уточнялся при сопоставлении данных параметрических расчётов и экспериментальных измерений.

7. Алгоритм экспериментального определения излучательной способности ТЗМ

1. Эксперимент проводится на воздушном сверхзвуковом высокотемпературном газодинамическом стенде с известными характеристиками потока, приближенными к траекторным параметрам полета КЛА.

2. В выбранном поперечном сечении набегающего потока устанавливается образец исследуемого ТЗМ и выполняется эксперимент по измерению нужных температур.

3. Измеряются яркостные температуры образца T_{w,λ_i} с использованием датчика Козырева.

4. Измеряется радиационная температура образца $T_{w,R}$ методом оптической пирометрии.

5. Методом сканирующего обтюратора определяется влияние «подсветки» на величину измеряемой яркостной температуры поверхности для двух длин волн λ_1 и λ_2 .

6. Используя соотношения (5.1) и (5.2), рассчитывают цветовую $T_{w,ЦВ}$ и истинную T_w температуры образца.

7. Используя соотношения (6.2) и (6.3), рассчитывают монохроматическую и интегральную степени черноты поверхности ТЗМ с учетом «подсветки».

8. С целью определения погрешности ϵ_λ и ϵ_w эксперимент в выбранном сечении набегающего потока для данного типа ТЗМ повторяется от трех до пяти раз.

8. Результаты экспериментального определения « $\epsilon_w - K_w$ » свойств УУКМ с термостойкими защитными покрытиями

В эксперименте « $\epsilon_w - K_w$ » свойства защитных покрытий на поверхности УУКМ определялись по изложенным в предыдущих разделах алгоритмам.

Результаты определения « $\epsilon_w - K_w$ » свойств приведены в таблице. В таблице представлена приведенная плотность теплового потока q_{T_w} , т.е. плотность теплового потока в теплоприемный элемент калориметра при температуре поверхности T_w , указанной в соответствующем столбце таблицы.

| № п/п | Тип покрытия | q_{T_w} , кВт/м ² | T_w , К | ϵ_w | K_w , м/с |
|-------|--------------|--------------------------------|-----------|--------------|-------------|
| 1 | УГЛЕРОД | 1405 | 2169 | 0,85 | >100 |
| 2 | SiTiMoCr | 650 | 1800 | 0,89 | 0,88 |
| 3 | SiTiMoB | 460 | 1780 | 0,78 | 0,18 |

Определение константы скорости каталитической рекомбинации K_w проводилось по алгоритму, изложенному в разд. 4. При этом необходимые параметры определялись из серии экспериментов, проведенных для одинаковых параметров набегающего потока посредством калориметрирования специальными калориметрами.

Так, например, при определении q_{0,K_w} теплоприемный элемент калориметра изготовлялся из меди М-1 без покрытия.

При определении K_w исследуемой композиции, поверхность приемного элемента покрывалась тонкой пленкой $\sim 20\text{--}30$ мкм. Эта операция удачно осуществлялась благодаря использованию НТГДМ-технологии.

По оценкам, относительная погрешность определения « $\epsilon_w - K_w$ » свойств в предложенном методе не превышала $+10\text{--}15\%$, что обеспечивалось погрешностью калориметрирования потоков $+10\%$ и другими инструментальными погрешностями.

Из приведенных в таблице данных следует, что наиболее оптимальным с позиции улучшения « $\epsilon_w - K_w$ » свойств является термостойкое композиционное покрытие Si-Ti-Mo-Cr.

Выводы

В работе предложен и апробирован метод экспериментального определения каталитических и излучательных свойств материалов тепловой защиты КЛА в условиях воздействия высокотемпературного потока с параметрами, близкими к траекторным. Показана важность постановки таких исследований для проектирования КЛА планирующего класса нового поколения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 06-08-00184-а.

Библиографический список

1. Никитин П.В. Тепловая защита: Учебник. — М.: Изд-во МАИ, 2006.
2. Никитин П.В., Степаненко С.А. Низкотемпературный газодинамический метод формирования многофункциональных покрытий на поверхности конструкций // 5-я международная конференция «Авиация и космонавтика — МАИ 2006». Материалы конференции. С. 115.
3. Nikitin P. Cold Gas Dynamic Method for Synthesis of the Composite Materials and Multifunctional Coating with the Predicted Thermophysical Characteristics // The Paper of the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion — 94. Denpasar, Bali, Indonesia, December 1994. P. 453.

4. Меснянкин С.Ю., Никитин П.В. Системы диагностики высокотемпературных газовых потоков: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 1991.

5. Агафонов В.П., Вертушкин В.К., Гладков А.А., Полянский О. Ю. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике. — М.: Машиностроение, 1972.

6. Воронин В.Г., Залогин Г.Н. О механизме рекомбинации атомарного азота вблизи каталитической поверхности, обтекаемой диссоциированным воздухом // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1980. №3.

7. Поуп Р. Конвективный теплообмен в критической точке при замороженном течении в пограничном слое. «AIAA Journal» 1968. Vol. 1. №2. P. 53—61.

8. Goulard R. On catalytic recombination rates in hypersonic stagnation heat transfer. Jet Propulsion, 1958. Vol. 28. № 11. P.128—140.

9. Анфимов Н.А. Ламинарный пограничный слой на химически активной поверхности // Известия АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1962. №3. С. 46—52.

10. Гулард Р. О влиянии скоростей каталитической рекомбинации на теплопередачу при торможении гиперзвукового потока // Вопросы ракетной техники. 1959. №5. С. 4—23.

11. Авдеевский В.С., Галицейский Б.М., Данилов Ю.И. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике; Под общ. ред. В.С. Авдеевского, В.К. Кошкина. 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1992.

12. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. — Л.: Машиностроение, 1973.

13. Полежаев Ю.В., Михатулин Д.С., Никитин П.В. Моделирование межфазного обмена в гетерогенных средах с целью разработки высокоэффективных технологий // ИФЖ, АН Беларуси. 1998. Т. 71. № 1. С.19—29.

14. Киренков А.Й. Метрологические основы оптической пирометрии. — М., 1976.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 17.11.2009