

УДК 536.3:681.586.5

Г. Ф. Горностаев, В. В. Пасичный, Г. В. Ткаченко

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича Национальной академии наук Украины, Київ

Методы контроля эксплуатационных характеристик теплозащиты волоконно-оптическими датчиками

Надійшла до редакції 03.11.06

Представлено результати розробки серії волоконо-оптичних датчиків для вимірювання таких експлуатаційних параметрів теплозахисту, як лінійне винесення маси, ефективний коефіцієнт поглинання, падаючий променевий тепловий потік. Досліджуються характеристики датчиків і обґрунтовується вибір алгоритмів вимірювання в умовах конвективного і радіаційного нагрівання. Доведено працездатність датчиків в умовах, що моделюють натурні умови роботи теплозахисного покриття.

Для получения реальных значений эксплуатационных характеристик теплозащиты КА последние снабжаются датчиками уноса теплозащитного материала (ТЗМ) и датчиками теплового потока на поверхность теплозащиты. Необходимость проведения таких измерений объясняется, недостаточной изученностью физических свойств ТЗМ при интенсивных тепловых нагрузках и острым дефицитом наземных испытательных стендов, способных в полной мере воспроизвести натурные условия работы изделия.

Основанием к выполнению проведенных разработок являлись заказы ведущих предприятий ракетно-космической отрасли (КБ «Южное», Московский институт теплотехники РАН, НПО «Энергия», ЦКБМ, КБ «Новатор»). Так, по заказу КБ «Новатор» (Россия) разрабатывались датчики уноса керамического наконечника изделия 63 Т6 («Стрела-2») для «системы последнего момента». Отсутствие надежных данных о термостойкости свойствах керамики (ниасита) при эксплуатационных условиях (конвективный тепловой поток $Q = 500 \text{ МВт/м}^2$, температура $T = 4500 \text{ К}$, давление $P = 12 \text{ МПа}$) не позволяли

точно рассчитать изменение формы наконечника, а следовательно, аэродинамического сопротивления и траектории полета изделия.

Аналогичные разработки выполнялись по заказу предприятия ЦКБМ (Россия) для баллистических систем.

По заказу НПО «Энергия» (Россия) разработан датчик уноса низкосублимирующей теплозащиты (ТЗМ ТП-41К, ТТПС-15, фторопласт-4) для спускаемого аппарата типа «Марс-5» для условий: $Q = 1.6 \text{ МВт/м}^2$, $T = 3000 \text{ К}$, $P = 40 \text{ кПа}$.

Анализ процесса прогрева и разрушения полупрозрачных материалов осложняется тем, что при их работе оптические свойства (ТЗМ) могут изменяться не только количественно, но и качественно.

Очень мало известно о влиянии на коэффициенты поглощения высоких температур и распределенных в теле неоднородностей в виде частичек других веществ (например, кокса).

Для оценки эффективности использования разрабатываемых ТЗМ необходимо иметь экспериментальные данные о текущем значении толщины ТЗМ, об изменении поглощательных

свойств материала при нагревании, о величине лучистой составляющей теплового потока, подводимого к поверхности ТЗМ.

Экспериментальная оценка трех указанных параметров с помощью специальных волоконно-оптических датчиков, которые устанавливаются в теплозащиту, была проведена на установках, моделирующих условия конвективного и радиационного нагрева ТЗМ.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕКУЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОЗАЩИТЫ

Наиболее перспективным направлением работ по созданию датчиков линейного уноса массы (ДУМ) теплозащитного покрытия космического аппарата представляется разработка непрерывного оптико-электронного датчика, использующего световоды из стекол-светофильтров. Рассмотрим волоконно-оптический датчик (рис. 1), который включает два световода, установленных на всю толщину $H_0 = H + L_k$ теплозащитного покрытия перпендикулярно к нагреваемой поверхности. Их температура плавления близка к

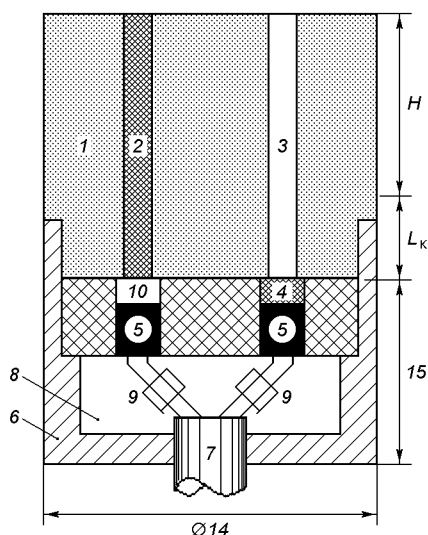


Рис. 1. Конструкция непрерывного ДУМ: 1 — ТЗМ, 2 — световод из светофильтра НС-3, 3 — прозрачный световод, 4 — фильтр НС-10, 5 — фотосопротивления СФЗ-1, 6 — корпус, 7 — электрический кабель, 8 — компаунд К-300, 9 — распайка СФЗ-1, 10 — прозрачное окно (H — величина линейного уноса массы, L_k — конечная толщина теплозащиты)

температуре разрушения ТЗМ. Один световод (3) выполнен из прозрачного оптического стекла, другой (2) — из светофильтра с заданной оптической характеристикой, которая согласована со спектральной характеристикой фотоприемника. Для того чтобы оба фотоприемника работали в близком диапазоне значений фотосопротивления (на участках с одинаковой крутизной энергетической характеристики сохраняется постоянное отношение сопротивлений при данном отношении освещенностей), между прозрачным световодом и фотоприемником помещен компенсаторный фильтр 4. Этот фильтр пропускает столько же света, сколько наполовину сгоревший (до длины $L_k + 0.5H$) световод из светофильтра.

В процессе уноса исследуемого теплозащитного материала длина L_u цветного световода уменьшается. Отношение световых потоков на выходе цветного (J_u) и прозрачного (J_n) волоконно-оптических каналов является функцией длины цветного световода из светофильтра:

$$L_u = a + k_u^{-1} \ln(J_u/J_n), \quad (1)$$

где $a = L_k + 0.5H$, k_u — коэффициент поглощения материала цветного световода из светофильтра, H — величина линейного уноса ТЗМ.

Полученное соотношение является достаточно простым, и что особенно важно — инвариантным по отношению к величине падающего лучистого потока на разрушаемую поверхность теплозащитного материала. Спектральная чувствительность фотоприемника может быть рассчитана по кривой спектральной эффективности для излучения равной мощности и по зависимости фотосопротивления от мощности излучения, измеренного для одной из длин волн.

Для цветного световода введем постоянную пропускания Λ_j и постоянную сопротивления Λ_R , так что при изменении длины световода на величину Λ_j его пропускание изменяется в e раз; при изменении длины световода на величину Λ_R в e раз изменяется фотосопротивление. Для фотосопротивления СФЗ-1 в качестве материала цветного световода предпочтительным является светофильтр НС-3. Для компенсаторного фильтра можно использовать стекло НС-10, имеющее большой коэффициент поглощения (0.744) в области максимальной чувствительно-

сти СФЗ-1. Результирующая энергия зарегистрированного излучения определяется произведением спектрального распределения энергии падающего излучения $W(\lambda)$, спектральной чувствительности $S(\lambda)$ фотоприемника и показателя пропускания $\tau_{\text{ц}}(\lambda)$ светофильтра, а эффективная освещенность по всему спектру равна

$$J = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda)\tau_{\text{ц}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda. \quad (2)$$

На рис. 2 приведены значения J , полученные методом численного интегрирования формулы (2) для СФЗ-1 и световодов различной длины из стекла НС-3, освещенных излучателем с цветовой температурой от 1000 до 2000 °С ($\lambda = 0.675 \dots 1.2$ мкм). Из-за близкого совпадения спектральных характеристик световода и приемника освещение происходит в достаточно узкой спектральной полосе, и перераспределение энергии в спектре излучения при изменении цветовой температуры $T_{\text{ц}}$ не оказывает решающего влияния: полулогарифмические зависимости длины $L_{\text{ц}}$ от освещенности J при всех температурах имеют одинаковый наклон и близкие

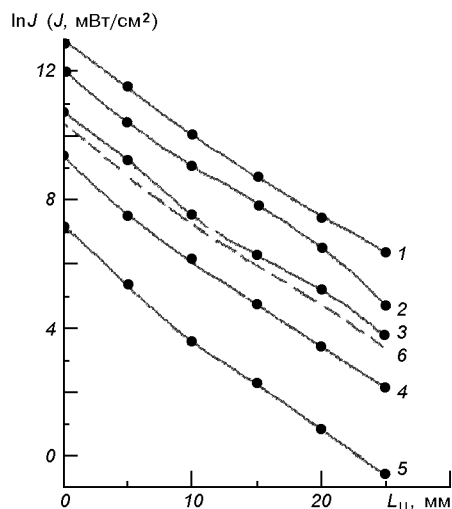


Рис. 2. Расчетная эффективная освещенность J фотоспротивления СФЗ-1 в зависимости от длины $L_{\text{ц}}$ световода из светофильтра НС-3 при различной цветовой температуре $T_{\text{ц}}$ излучателя: 1 — $\Lambda_j = 3.975$ мм, $T_{\text{ц}} = 2000$ °С, 2 — $\Lambda_j = 3.65$ мм, $T_{\text{ц}} = 1750$ °С, 3 — $\Lambda_j = 4.40$ мм, $T_{\text{ц}} = 1500$ °С, 4 — $\Lambda_j = 3.78$ мм, $T_{\text{ц}} = 1250$ °С, 5 — $\Lambda_j = 3.90$ мм, $T_{\text{ц}} = 1000$ °С, 6 — средние значения

значения постоянных Λ_j в линейной части зависимости. Наиболее существенно, что с изменением температуры и интенсивности освещения сохраняется практически одна и та же постоянная длины и постоянное соотношение между освещенностью в цветном канале определенной длины и в прозрачном канале. Эта стабильность позволяет сравнивать освещенности в прозрачном и цветном каналах инвариантно к интенсивности внешнего освещения.

Поскольку связь между освещенностью J и фотоспротивлением $R_{\text{фп}}$ нелинейная, то при расчете Λ_R учитывалась крутизна c логарифмической характеристики для приближенного линейного ее участка $\lg R_{\text{фп}} = b - c \lg J$ ($\Lambda_R = \Lambda_j/c$); b и c — постоянные.

Градуировка непрерывного ДУМ проводилась путем последовательного укорачивания длины цветного световода $L_{\text{ц}}$ при освещении его входного торца ленточной лампой накаливания СИ 10—300 с яркостной температурой около 2000 °С. Полученная зависимость длины цветного световода от соотношения фотоспротивлений в цветном и прозрачном каналах аппроксимируется зависимостью, аналогичной теоретическому соотношению (1), но вместо отношения освещенностей фигурирует отношение фотоспротивлений в прозрачном и цветном каналах:

$$H = L_{\text{ц}} = a_1 + c_1^{-1} \ln(R_n/R_{\text{ц}}), \quad (3)$$

где a_1 , c_1 — постоянные.

Проведены стендовые испытания датчиков из сублимирующего ТЗМ (фторопласт-4) в струе газогенератора. Скорости разрушения ТЗМ и цветного световода практически совпадают, наличие световодов не оказывает влияния на разрушение поверхности фторопласта-4 в местах расположения оплавленных торцов световодов. Экспериментальные зависимости величины фотоспротивления от текущего значения длины цветного световода дают близкие значения постоянной длины ($\Lambda_R \approx 3.8$ мм) цветного световода для различных условий нагрева. Результаты измерения величины уноса фторопласта-4 с помощью ДУМ (рис. 3) с точностью до 10 % совпадают с данными кино съемки.

Выбраны две пары (легированное кварцевое стекло + фотоприемник) для непрерывного датчика уноса высокотемпературных ТЗМ (кварце-

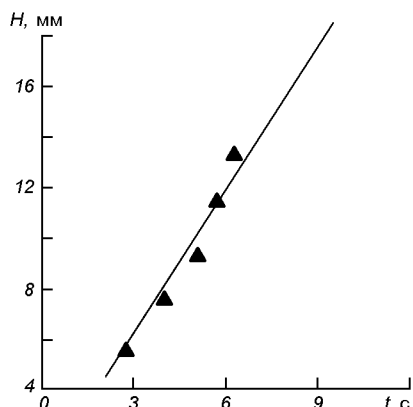


Рис. 3. Измеренные значения H линейного уноса массы фторопласта-4 в струе газогенератора: треугольники — результаты киносъемки, линия — данные датчика (тепловой поток $Q = 16 \text{ МВт/м}^2$, температура и давление торможения — $P_e = 550 \text{ кПа}$, $T_e = 5500 \text{ К}$)

вая керамика, асбо- и стеклопластик). Каждая оптоволоконная пара исследовалась на предмет зависимости величины сопротивления фоторезистора от длины световода.

В качестве калиброванного источника излучения использовалась ленточная температурная лампа СИ10-300. Измерения проводились при яркостной температуре $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ путем последовательного укорачивания световодов и полировки обрезанного торца.

Результаты градуировки оптоэлектронных пар представлены на рис. 4.

Сочетание этих оптоэлектронных пар позволяет перекрыть значительную область возможных величин линейного уноса ТЗМ. Выбор пары зависит от конкретных условий испытания и типа ТЗМ.

ОЦЕНКА ЛУЧИСТОГО ТЕПЛОвого ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТЬ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА

В реальных условиях работы теплозащитного покрытия задача численного расчета величины подводимого радиационного теплового потока (РТП) значительно усложняется, поскольку для этого необходимо знать термодинамические и оптические свойства газовой смеси в каждой точке слоя за скачком уплотнения, а также тепловые нагрузки в любой точке поверхности.

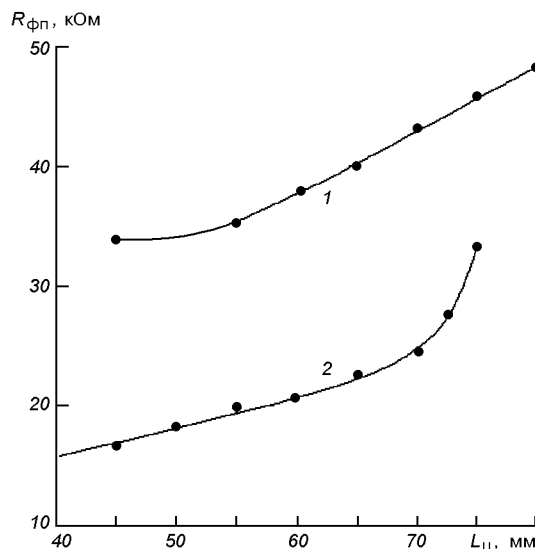


Рис. 4. Градуированные зависимости оптоэлектронных пар: 1 — фоторезистор СФ2-5, световод из кварца КЛИ-1 ($\varnothing 1 \text{ мм}$); 2 — фоторезистор СФ2-16, световод из кварца КЛС3-1 ($\varnothing 1 \text{ мм}$)

Анализ результатов [1, 2], полученных при испытании датчиков радиационного теплового потока со сквозным световодом в условиях радиационного нагрева на солнечном концентраторе СГУ-4) и конвективного нагрева на газогенераторе, свидетельствует о наличии трех характерных точек 1, 2, 3, определяющих динамику изменения величины светового потока на выходе «сквозного» световода в процессе его теплового разрушения (рис. 5). Эти точки соответствуют динамике процесса накопления тепла в поверхностном слое материала при его плавлении [3, 4]. Первая точка соответствует оплавлению световода, вторая точка — началу интенсивного свечения торца световода, третья — стабилизации светового сигнала в результате прогрева всего световода. Участок 2—2' на кривой II возник из-за медленного прогрева вглубь сублимирующего материала, а следовательно, и световода.

Часть падающего потока $J_{\text{вп}}$ поглощается, а затем «высвечивается» жидкой пленкой стекла, поэтому величина светового потока на фотоприемнике $J_{\text{фп}}$ является результатом установления теплового равновесия излучений источника нагрева и торца световода. Чем больше величина

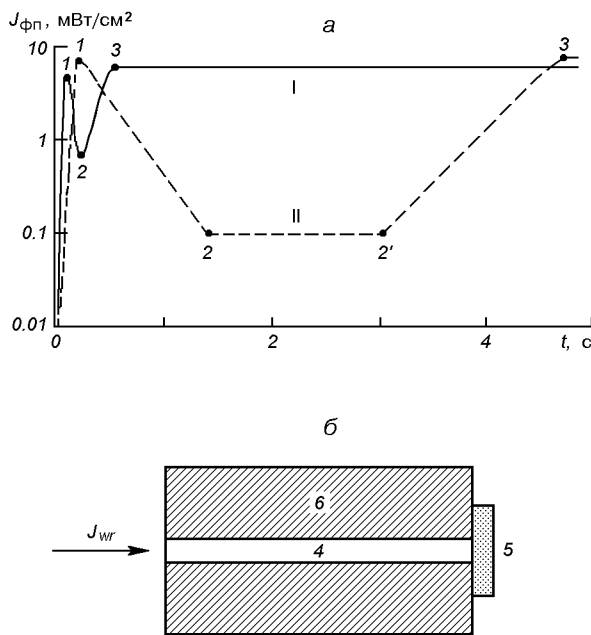


Рис. 5. Изменение потока $J_{фп}$ на приемнике датчиков РТП со «сквозными» световодами (а): I — газогенератор: ТЗМ АСД (конвективный тепловой поток $Q = 16$ МВт/м², давление и температура торможения $P_e = 300$ кПа, $T_e = 2900$ К); II — СГУ-4: ТЗМ ТТПС-15 ($J_{wr} = 9.2$ МВт/м²); б — датчик РТП (J_{wr} — падающий поток, 4 — световод, 5 — приемник, 6 — ТЗМ)

подводимого радиационного потока J_{wr} , тем ярче светится оплавленный торец световода.

По энергетической характеристике фоторезистора СФЗ-1 для точек 1, 2, 3 (рис. 5, а) были определены значения световых потоков на фотоприемнике ($J_{фп1} = 8$ МВт/см², $J_{фп2} = 0.1$ МВт/см², $J_{фп3} = 8.5$ МВт/см²), а также показатели светопропускания холодного световода ($\tau = 0.83$) и оплавленного световода ($\tau_* = 0.102$). По ним были рассчитаны показатель светопропускания $\tau_{пс}$ пограничного слоя над поверхностью ТЗМ и интенсивность $J_{св}$ собственного теплового излучения световода:

$$J_{wr} = \frac{J_{фп1}}{\tau} = \frac{8 \text{ МВт/см}^2}{0.83} = 9.638 \text{ МВт/см}^2.$$

$$\tau_{пс} = \frac{J_{фп2}}{J_{wr} \tau_*} = \frac{0.1 \text{ МВт/см}^2}{9.638 \text{ МВт/см}^2 \cdot 0.102} = 0.104.$$

$$J_{св} = J_{фп3} - J_{wr} \tau_{пс} \tau_* = 8.4 \text{ МВт/см}^2.$$

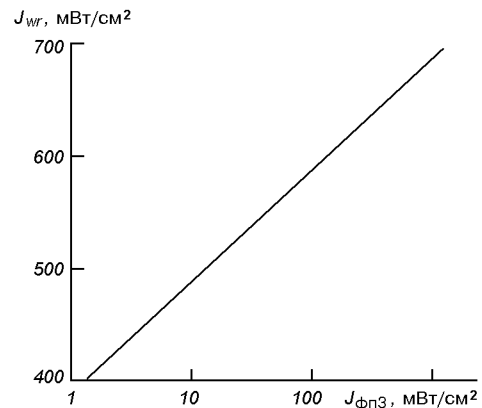


Рис. 6. Градуировочная зависимость датчика РТП со сквозным световодом: J_{wr} — падающий поток, $J_{фп3}$ — световой поток на фотоприемнике

Для штатного сублимирующего материала ТП-41К проведена градуировка датчика РТП со сквозным стеклянным световодом на установке «Уран» (рис. 6). Световой поток $J_{фп3}$ соответствует стабилизированному значению потока на фотоприемник после оплавления торца световода. Получена линейная зависимость $J_{фп3}$ от J_{wr} . Флуктуация параметра $J_{фп3}$ не превышает 3%. Точность градуировки определяется в основном погрешностью задания величины J_{wr} в фокальном пятне $\varnothing 1$ мм (диаметр световода) и составляет около 10% [3].

КОНТРОЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ПОГЛОЩАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА

Для экспериментальной оценки эффективного коэффициента поглощения материала (ЭКП), включающего влияние продуктов разрушения ТЗМ, предложен метод измерения и разработан датчик (рис. 7) для его реализации. Датчик включает сквозной стеклянный световод, два «внутренних» световода, три фотосопротивления СФЗ-1, а также исследуемый полупрозрачный сублимирующий материал (ТТПС-15) и непрозрачный экран из асбобластика. Сквозной световод 1 служит для оценки падающего лучистого потока, «внутренний» световод 2 — для оценки лучистого потока, прошедшего через слой про-

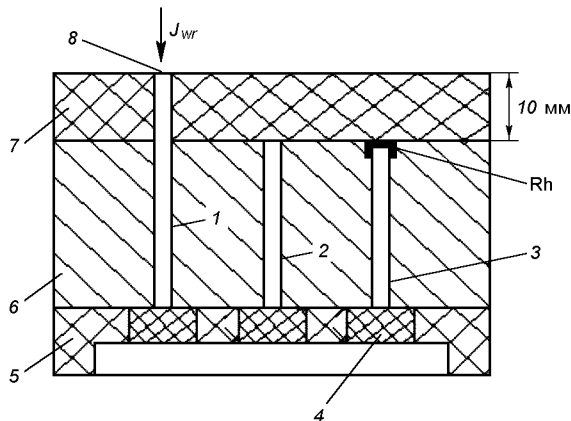


Рис. 7. Датчик ЭКП теплозащиты: Rh — пленка родия, J_{wr} — падающий лучистый поток, 1 — сквозной световод, 2 — «внутренний» световод, 3 — световод с пленкой родия, 4 — фоторезистор, 5 — втулка, 6 — ТЗМ АСД, 7 — ТЗМ ТТПС-15

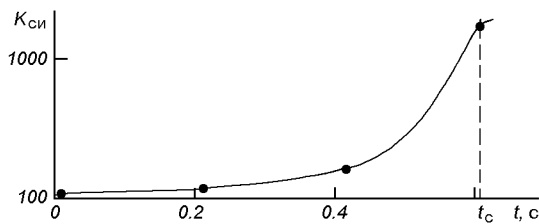


Рис. 8. Изменение $K_{си}$ материала ТТПС-15 при лучистом нагреве на СГУ-4: $J_{wr} = 920 \text{ Вт/см}^2$

дуктов сублимации и слой исследуемого ТЗМ; световод 3, торец которого покрыт пленкой родия, необходим для оценки собственного теплового излучения световода. Диаметр световодов равен 1 мм.

Погрешность измерения величины ЭКП определяется в основном погрешностью определения отношения световых потоков на выходе световодов по энергетической характеристике СФЗ-1 (примерно 15 %).

При нагревании материала ТТПС-15 происходит коксование поверхности ТЗМ (материал «дымит»). Измеренное датчиком с «внутренним» световодом 2 время, за которое сигнал датчика стабилизируется, составило $t_c = 0.6 \text{ с}$ (рис. 8).

За время проведения измерений толщина слоя ТТПС-15 (10 мм) практически не изменилась

вследствие малой скорости уноса ТЗМ.

Для характеристики поглощательных свойств системы, которую составляют газообразные продукты сублимации и слой ТЗМ, используется эффективный коэффициент $K_{си}$ поглощения системы (рис. 8). Если обозначить выражением $K_{тзм}$ коэффициент поглощения слоя ТЗМ, $K_{пс}$ — коэффициент поглощения пограничного слоя, J_c — стабилизированное значение светового потока, упавшего на торец «внутреннего» световода без пленки родия, имеем

$$K_{си} = K_{тзм} K_{пс},$$

$$K_{пс} = \tau_{пс}^{-1} = 9.6,$$

$$K_{си} = \frac{J_{wr}}{J_c} = \frac{9.638 \text{ мВт/см}^2}{6.5 \text{ мкВт/см}^2} = 1480,$$

$$K_{тзм} = 153.9.$$

Следовательно, основной вклад в поглощение системы вносят не газообразные продукты сублимации ТТПС-15, а тонкий коксовый слой на поверхности ТЗМ, появление которого через время $t_c = 0.6 \text{ с}$ на порядок снижает интенсивность лучистого нагрева внутри полупрозрачного ТЗМ.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны алгоритмы экспериментального определения с помощью волоконно-оптических датчиков текущего значения толщины H ТЗМ, эффективного коэффициента $K_{си}$ поглощения, лучистого теплового потока J_{wr} на уносимую поверхность ТЗМ:

$$H = a_1 + C_1^{-1} \ln(R_n/R_0)$$

$$K_{си} = J_{wr}/J_c(t_c) = K_{тзм} K_{пс},$$

$$J_{wr} = (J_{фпз} - J_{св})/\tau * \tau_{пс}$$

Экспериментальное определение датчиками указанных параметров в процессе летных испытаний изделий ракетно-космической техники позволит увеличить надежность проектирования теплозащиты.

2. Керамические наконечники с датчиками уноса признаны годными к комплектации изделий 63 Т6 предприятия КБ «Новатор» (Россия).

1. Горностаев Г. Ф., Пасичный В. В., Ткаченко Г. В. Метод измерения лучистой составляющей теплового потока на поверхности керамической теплозащиты // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.— С. 98—102.
2. Горностаев Г. Ф., Теплякова О. А. Применение световодов для выделения лучистой составляющей теплового потока // Порошковая металлургия.—1996.—№ 5/6.— С. 48—51.
3. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. — М.: Машиностроение, 1975.—224 с.
4. Цикулин М. А., Попов Е. Г. Излучательные свойства ударных волн в газах. — М.: Наука, 1977.—176 с.

METHODS FOR CONTROL OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF THERMAL INSULATION DEVICES BY FIBER-OPTICAL SENSORS

G. F. Gornostaev, V. V. Pasichny, G. V. Tkachenko

The data are represented concerning the development of the series of the fiber-optical sensor intended for measuring such operational parameters of thermal insulation devices as the value of linear ablation, effective absorption coefficient, incident radiant flux. The data are given concerning the investigation of the sensors characteristics and the selection of the algorithms is grounded for measuring under conditions of convection and radiant heating. The sensors operating capacity is proved under conditions which model full-scale conditions of thermal insulation coating operating.