

УДК 621.1.016:536.2

**Г. Ф. Горностаев**

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. Н. Францевича Національної академії наук України, Київ

## **МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА УНОСИМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТЫ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

*Розроблено методіку вимірювання та волоконно-оптичні давачі для визначення величин віднесення маси, товщини прогрітого шару і температури поверхні керамічного теплозахисту, що відноситься. Подано результати вимірювання вказаних параметрів штатного кварцового наконечника в умовах, близьких до експлуатаційних.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Надежность проектирования эффективного теплозащитного покрытия космического аппарата (КА) в значительной степени определяется достоверностью сведений об изменении в полете следующих характеристик граничных условий: величина линейного уноса массы, толщина прогретого слоя, температура уносимой поверхности. С этой целью КА снабжаются специальными датчиками [2, 3] уноса массы теплозащитного материала (ТЗМ).

Работа выполнялась по заказу КБ «Новатор» при участии НПО «Технология» и Воткинского машзавода (Россия) с целью исследования эксплуатационных характеристик штатного наконечника антиракеты «Стрела-2» при стендовых испытаниях. Как будет показано ниже, именно волоконно-оптические датчики (ВОД) позволяют реализовать комплексный подход при исследовании процесса абляции ТЗМ.

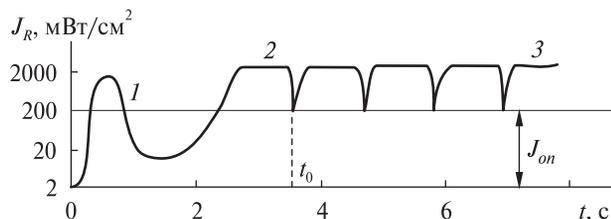
Представленные ниже ВОД предназначены для оценки трех характеристик процесса абляции: линейного уноса, температуры поверхности, толщины прогретого слоя теплозащиты. Отсутствие таких данных для керамической теплозащиты объясняется сложностью установления каких-либо других датчиков без нарушения целостности и прочностных характеристик кварцевой керамики «ниасит». Благодаря высокому

суммарному тепловому эффекту аморфные материалы, в том числе «ниасит» (кварцевая керамика), являются более эффективным ТЗМ, чем кристаллические. Однако физическая модель их разрушения и схема расчета оказываются намного сложнее. Практически нет данных о термомеханических свойствах таких материалов при условиях, близких к эксплуатационным. Для изделия «Стрела-2» параметры торможения составляют:  $P_e = 12$  МПа,  $T_e = 4500$  К, конвективный тепловой поток  $q = 500$  МВт/м<sup>2</sup>).

С учетом вышеизложенного применение кварцевых волоконно-оптических датчиков для измерения уноса массы в точке торможения наконечника гиперзвуковой антиракеты «Стрела-2» представляет научный и практический интерес.

### **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ $\epsilon_{оп}$ И КОЭФФИЦИЕНТА СВЕТОПРОПУСКАНИЯ $\tau$ , ОПЛАВЛЯЕМОГО ТОРЦА КВАРЦЕВОГО СВЕТОВОДА**

Измерения проводились на стенде лучистого нагрева «Уран» с 10-кВт ксеноновой лампой, расположенной внутри зеркального концентратора диаметром 0.6 м. Кварцевый световод диаметром 1 мм длиной 40 мм был установлен перпендикулярно к нагреваемой поверхности образца из стеклопластика СТКТ-11 (на оси образца). Механическая модуляция величины падающего радиационного теплового потока (РТП) обеспе-



**Рис. 1.** Изменение потока  $J_R$  на фотоприемнике для датчика со «сквозным» кварцевым световодом диаметром 1 мм, установленным в ТЗМ СТКТ-11 ( $t_0$  — начало модуляции подводимого лучистого потока,  $J_{оп}$  — поток, обусловленный свечением оплавленного торца световода)

чивала время затенения поверхности образца  $\Delta t = 0.04$  с. Мощность подводимого потока в центре фокального пятна равнялась  $q_R = 8$  Вт/мм<sup>2</sup>. Для регистрации температуры поверхностного слоя ТЗМ в образце была установлена термопара.

Под нижним торцом световода расположен фоторезистор СФЗ-1, амплитудная характеристика которого была детально исследована и приведена к максимальной чувствительности на длине волны  $\lambda_m = 0.72$  мкм. Около 75 % чувствительности приемника сосредоточено в полосе длин волн  $\Delta\lambda = 0.65...0.75$  мкм. Чем меньше  $\Delta\lambda/\lambda$ , тем меньше погрешность определения эффективной длины волны

$$\lambda_{эф} = \lambda_m.$$

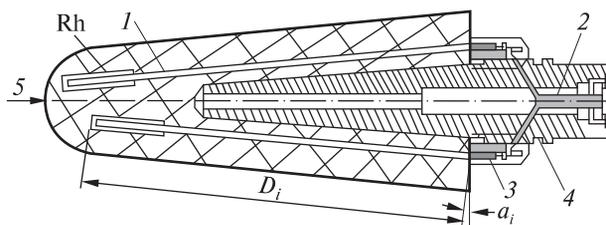
Изменение амплитуды сигнала датчика представлено на рис. 1. «Провал» на участке 1 — 2 появляется вследствие проявления эффекта накопления тепла в материале [5], которое происходит до установления стационарного процесса оплавления ТЗМ (участок 2 — 3). С учетом глубины заделки термопары температура  $T_w$  поверхности ТЗМ составила примерно 2300 К.

Суммарный световой поток  $J_R$  на фотоприемнике определяется потоком  $J_{оп}$ , излученным торцом световода, а также частью подводимого внешнего потока, которая прошла через оплавленный торец световода с коэффициентом пропускания  $\tau_*$ :

$$J_R = q_R \cdot \tau_* + J_{оп}.$$

Согласно результатам измерений, приведенных к  $\lambda_{эф} = \lambda_m$ , имеем

$$J_R (R_{фп} = 0.35 \text{ к}\Omega) = 3.20 \text{ Вт/мм}^2,$$



**Рис. 2.** Наконечник с датчиками (1 — световод, 2 — электрокабель, 3 — приемник СФЗ-1, 4 — металлический «палец», 5 — поток газа,  $\alpha_i$  — угол наклона оси световода,  $D_i$  — длина  $i$ -го световода)

$$J_{оп} (R_{фп} = 0.70 \text{ к}\Omega) = 0.32 \text{ Вт/мм}^2,$$

$$\tau_* = (J_R - J_{оп}) / q_R = 0.36.$$

Значение  $\tau_*$  характеризует процессы отражения и рассеяния падающего потока  $q_R$  на оплавленном торце световода.

Считая излучение торца световода слабоселективным, получим

$$\varepsilon_{оп} = J_{оп} / (\sigma T_w^4) = 0.2,$$

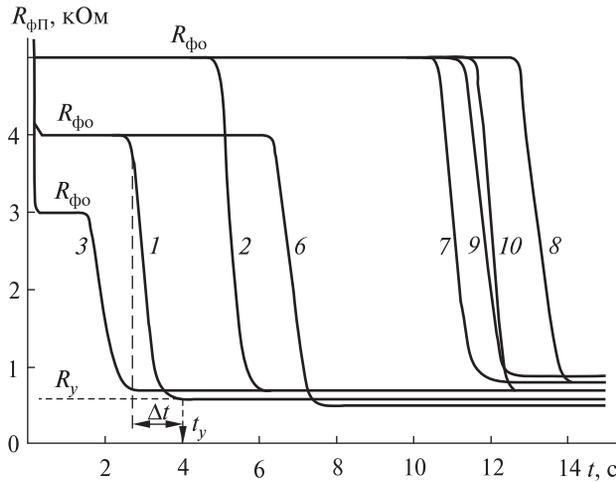
где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/см<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>,  $T_w = 2300$  К.

В работе [4] при модельных расчетах  $T_w$  кварцевого стекла используют значения  $\varepsilon_{оп} = 0.1, 0.3$ .

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРЫ $T_w^*$ УНОСИМОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАКОНЕЧНИКА ИЗ «НИАСИТА»

Конструкция штатного наконечника для антиракеты «Стрела-2», который оснащен волоконно-оптическими датчиками уноса массы, представлена на рис. 2, а расположение торцов световодов в наконечнике соответствует табл. 1. Стендовые испытания наконечника с датчиками в составе первой сборки изделия «Стрела-2» проводились на газодинамическом стенде Воткинского машзавода при следующих параметрах торможения:  $P_e = 11$  МПа,  $T_e = 3100$  К,  $q = 42$  МВт/мм<sup>2</sup>. Верхние торцы и часть боковой поверхности световодов покрыты светозащитной пленкой родия Rh толщиной около 4 мкм.

На рис. 3 представлено изменение сопротивления  $R_{фп}$  фотоприемников СФЗ-1, расположенных под нижними торцами световодов (табл. 1). Значение  $R_{фп} = R_y$  соответствует моменту выхода горячего торца световода с пленкой Rh на уно-



**Рис. 3.** Изменение фотосопротивления  $R_{\text{фп}}$  приемника при уносе массы керамического наконечника (1, ..., 10 — номера световодов с пленкой родия на торце,  $\Delta t$  — время стабилизации сигнала датчика,  $t_y$ ,  $R_y$  — факторы, определяющие момент уноса слоя ТЗМ,  $R_{\text{фо}}$  — «фоновый» уровень фотосопротивления, обусловленный полупрозрачностью «ниасита»)

симую поверхность конуса. Излучение факела, которое прошло через полупрозрачный ниасит, попадает на незащищенную родием боковую поверхность световода и затем по световоду на приемник создает «фоновое» значение  $R_{\text{фо}} = 3...5$  кОм (табл. 2). Согласно амплитудной характеристике приемника СФЗ-1 (для длины волны максимальной чувствительности  $\lambda_m = 0.72$  мкм), среднее значение «фонового» потока  $J_{\text{фо}} < 2$  мВт/мм<sup>2</sup>.

**Таблица 1.** Данные о расположении торцов световодов в наконечнике ( $D_i$  — длина  $i$ -го световода,  $\alpha_i$  — угол наклона  $i$ -го световода)

Параметр	Номера световодов										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\alpha_i$ , град	4°55'	4°52'	1°26'	4°41'	5°12'	2°45'	1°11'	5°17'	2°14'	3°26'	4°25'
$D_i$ , мм	185.4	176.7	175	177.5	170.7	178.5	170	178.5	180	183.4	15

**Таблица 2.** Значение фотосопротивлений единичных датчиков (№№ 1...10):  $R_{\text{фо}}$  — фоновое значение,  $R_y$  — значение, соответствующее «срабатыванию» датчика при уносе данного слоя «ниасита»

Сопротивление	Номер датчика									
	1	2	3	6	7	8	9	10		
$R_{\text{фо}}$ , кОм	4	4	3	4	5	5	5	5		
$R_y$ , кОм	0.55	0.70	0.70	0.45	0.75	0.75	0.75	0.70		

Используя полученное выше значение  $\tau_s$ , а также значения  $R_{\text{фп}}$ , полученные на газодинамическом стенде (табл. 2), получаем интенсивность излучения торца световода при уносе «ниасита»:

$$J_y(R_{\text{фп}} = 0.45 \text{ кОм}) = 0.44 \text{ Вт/мм}^2.$$

Поскольку  $J_{\text{фо}} \ll J_y$ , можно считать, что «фоновое» излучение  $J_{\text{фо}}$  практически не оказывает влияния на величину полезного сигнала датчика.

Теперь оценим радиационный тепловой поток  $q_{RW}$  от излучающего газа на поверхность конуса следующим образом. Сжатый слой перед наконечником с радиусом затупления  $R = 2$  см можно считать оптически прозрачным вследствие его малой геометрической толщины. Следовательно, расчетное значение радиационного теплового потока на поверхность модели составляет (при скоростях движения  $V < 9$  км/с [4]):

$$q_{rk} = 1.5 \text{ мВт/мм}^2.$$

Однако, кроме сплошного излучения  $q_{rk}$  континуума, есть излучение атомов в линиях. Это излучение может вносить примерно такой же вклад в величину  $q_{RW}$ , что и континуальное излучение. В сумме получаем  $q_{RW} = 3.0$  мВт/мм<sup>2</sup>.

Тот факт, что  $q_{RW} \ll J_y$ , подтверждается отсутствием излома на графике (рис. 3) на участках  $R_{\text{фо}} - R_y$ . Поскольку  $q_{RW} \ll J_y$ , будем считать, что суммарный поток на приемнике определяется только излучением торца световода после его выхода на поверхность ТЗМ:  $J_{\text{фп}} = J_y$ .

Таким образом, можно принять, что для наконечника из «ниасита» в сером приближении имеем

$$T_w^* = (J_y / \varepsilon_{\text{оп}} \sigma)^{0.25} = 2500 \text{ К.}$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО УНОСА МАССЫ И ГЛУБИНЫ ПРОГРЕВА ПОЛУСФЕРИЧЕСКОГО ЗАТУПЛЕНИЯ НАКОНЕЧНИКА

Моменты выхода торцов световодов, покрытых пленкой родия, на уносимую поверхность наконечника из «ниасита» определялись по стабилизации световых потоков на фотоприемниках (рис. 3). Координаты торцов определялись с помощью рентген-контроля наконечника в двух плоскостях. Динамика процесса уноса материала при осесимметричном обтекании изделия потоком высокотемпературного газа представлена на рис. 4. Средняя линейная скорость уноса массы составила  $V_y \approx 1 \text{ мм/с}$ .

Для кварцевого стекла стабилизация скорости уноса массы наступает примерно через 0.6 с, а стабилизация температуры поверхности ТЗМ через 0.3 с [1], т. е. до момента выхода торца световода на уносимую поверхность. Следовательно, можно считать, что измерения проводились в квазистационарном режиме уноса «ниасита».

Для определения изменения глубины прогрева ниасита вдоль поверхности полусферы (радиусом 2 см) применена следующая методика.

Определив из графика на рис. 3 параметр  $\Delta t$  для каждого датчика, можно оценить толщину прогретого слоя ниасита:

$$\delta = V_y \Delta t.$$

На рис. 5 представлено изменение толщины  $\delta$  горячего верхнего слоя (имеющего температуру  $T_{\delta} \geq 1000 \text{ К}$ ) «ниасита» в радиальном направлении относительно оси наконечника. Максимальному значению подводимого конвективного теплового потока (а также  $T_w^*$ ) на оси полусферы соответствует минимальная толщина прогретого слоя. По мере уменьшения подводимого потока в радиальном направлении соответственно увеличивается глубина  $\delta$  прогрева материала от 0.9 до 1.6 мм. Температура  $T_{\delta} = 1000 \text{ К}$  является минимально возможной температурой, способной вызвать резкий скачок величины  $R_{\text{фп}}$  для прием-

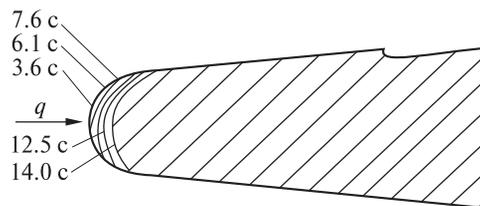


Рис. 4. Усредненные данные по уносу массы нескольких наконечников с датчиками ( $q$  — конвективный тепловой поток от струи газогенератора)

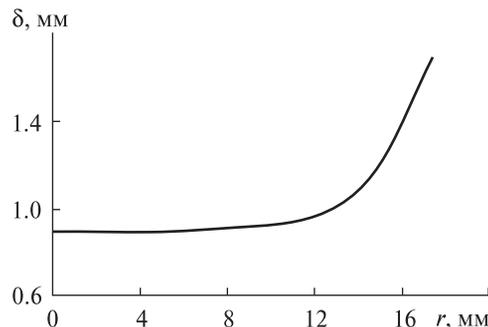


Рис. 5. Результаты расчета радиального распределения толщины  $\delta$  прогретого слоя наконечника ( $r$  — расстояние от оси наконечника)

ника СФЗ-1. Этот факт был установлен путем модельного эксперимента, включающего нагрев и оплавление торца световода.

### ВЫВОДЫ

1. Получены значения линейной скорости уноса массы, глубины прогрева и температуры поверхности штатного наконечника из ниасита для изделия «Стрела-2» в условиях, близких к эксплуатационным.

2. Зафиксировано значительное увеличение температуры поверхности «ниасита» по сравнению с температурой плавления, что является следствием высокого давления торможения струи ( $P_c = 11 \text{ МПа}$ ).

3. Поскольку температура поверхности стеклообразного ТЗМ слабо зависит от коэффициента теплообмена [4], а следовательно, и от размеров нагреваемого тела, полученный результат по оценке температуры поверхности  $T_w^*$  наконечника с радиусом закругления  $R = 2 \text{ см}$  может быть полезен и при оценке  $T_w^*$  изделий с другими значениями радиуса  $R$ .

4. Поскольку скорость уноса велика (около 1 мм/с), а толщина прогретого слоя ( $T_{\delta} \geq 1000$  К) мала, образование кристобаллитной фазы на торце кварцевого световода не успевало произойти. Этим объясняется высокое значение коэффициента пропускания  $\tau_*$ .

5. Характер изменения величины  $\delta(r)$  является следствием наличия натечной пленки на боковой поверхности конуса (поскольку сдвигающие усилия газового потока были недостаточно велики), следовательно, на оси конуса ( $r \rightarrow 0$ ) унос массы происходил в основном за счет испарения «ниасита».

1. Горностаев Г. Ф., Пасичный В. В., Ткаченко Г. В. Методы контроля эксплуатационных характеристик теплозащиты волоконно-оптическими датчиками // Космічна наука і технологія. — 2007. — **13**, № 3. — С. 12—18.
2. Лежандр Ф. Ж. Аппаратура для испытания носовых частей баллистических ракет при входе в плотные слои атмосферы // Экспресс-информ. ВИНТИ.

Сер. Испытательные приборы и стенды. — 1978. — № 23. — С. 10—22.

3. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. — М.: Машиностроение, 1976. — 224 с.
4. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. — М.: Энергия, 1976. — 392 с.
5. Скороход В. В., Фролов Г. А., Горностаев Г. Ф. Аномальная теплопередача на границе шлак-металл в установке электрошлакового переплава // Доповіді НАН України. — 2004. — № 7. — С. 90—96.

Надійшла до редакції 25.03.10

G. F. Gornostaev

SOME METHODS FOR DIAGNOSTICS  
OF BOUNDARY CONDITIONS UNDER ABLATION  
OF THERMAL INSULATION SURFACE  
WITH THE USE OF FIBRE OPTICAL SENSORS

Some measurement procedures are fibre optical sensors are developed for the determination of ablation, heated layer thickness and temperature of ceramic thermal insulation surface being destructed. Our measurement results for the named parameters are presented for the standard quartz cap under the conditions simulating the operational ones.