

УДК 536.3:681.586.5

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

Институт проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

**Метод измерения лучистой составляющей  
теплового потока  
на поверхности керамической теплозащиты**

*Надійшла до редакції 04.10.05*

У результаті дослідження власного теплового випромінювання «наскрізного» світловоду, встановленого у теплозахисному матеріалі, отримано градувальну залежність для давача радіаційного теплового потоку. Розроблено технологію виготовлення керамічного наконечника, оснащеного волоконно-оптичними давачами. Встановлено, що при армуванні кварцової кераміки (ніаситу) кварцовими світловодами ударна в'язкість наконечника суттєво збільшується. За допомогою давачів виміряно знесення маси та радіаційний тепловий потік на аблюючу поверхню.

Проблема теплообмена при сверхорбитальных скоростях входа космического аппарата (КА) в атмосферу вызвала в последнее время многочисленные попытки детально и точно рассчитать перенос энергии от высокотемпературного, теплопроводного и излучающего сжатого газа. Эти расчеты сопровождалась экспериментальными исследованиями в ударных трубах характеристик газов при высоких температурах. Среди них можно отметить измерение яркости ударных волн в газах фотографическими и фотоэлектрическими методами [3]. В реальных условиях работы теплозащитного покрытия задача численного расчета модели взаимодействия и величины 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.

В данной работе для измерения РТП используются волоконно-оптические датчики, которые

одновременно позволяют определять и величину уноса массы керамического наконечника.

Несимметричность потери массы теплозащитного покрытия КА приводит к изменению силы лобового сопротивления и возникновению случайных углов атаки, что оказывает существенное влияние на изменение траектории полета и спуска КА.

Геометрическая форма носового притупления определяется аэродинамическими характеристиками изделия, которые в процессе полета существенно изменяются. Расчет геометрической формы носового притупления практически невозможен, так как отсутствуют данные о теплофизических и прочностных характеристиках кварцевой керамики при натуральных условиях:  $q = 5 \cdot 10^5$  кВт/м<sup>2</sup>,  $T_0 = 4500$  К,  $P_0 = 12$  МПа. Здесь  $q$  — суммарный тепловой поток,  $T_0$  и  $P_0$  — температура и давление торможения. Поэтому получение таких данных с помощью световодных датчиков представляет научный и практический интерес.

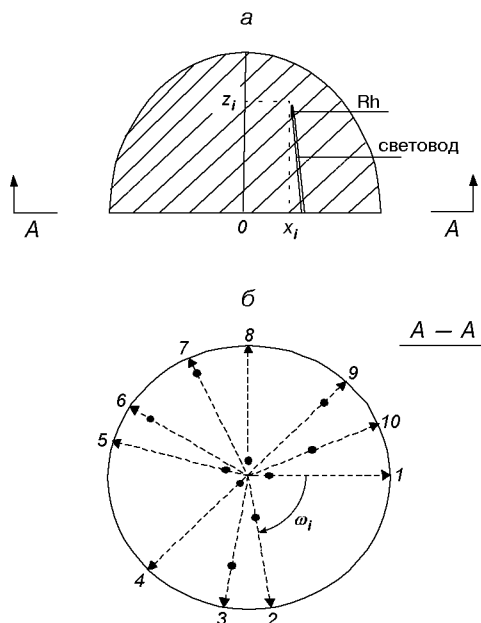


Рис. 1. Две плоскости, в которых проводился рентген-контроль наконечника: *a* — вертикальная (*Rh* — родий,  $x_i, z_i$  — координаты торца *i*-го световода); *б* — горизонтальная (1...10 — номера световодов,  $\omega_i$  — угловая координата торца *i*-го световода, точки — торцы световодов, стрелки — направление контроля *i*-го световода)

ехнологический процесс формования наконечника вместе с кварцевыми световодами освоен в НПО «Технология» (Россия) и включает следующие операции [1]:

- подготовка стекла и приготовление шликера;
- изготовление и подготовка гипсовых форм;
- формование;
- сушка и обжиг, механическая обработка, сборка;
- нанесение влагозащитного покрытия.

В торце изделия световоды расположены по окружности на одинаковом расстоянии друг от друга. В вершине конуса все световоды находятся на разной высоте и разном расстоянии от поверхности наконечника; место расположения торца световода (покрытого пленкой родия) обусловлено длиной световода и углом наклона к оси конуса (рис. 1, 2).

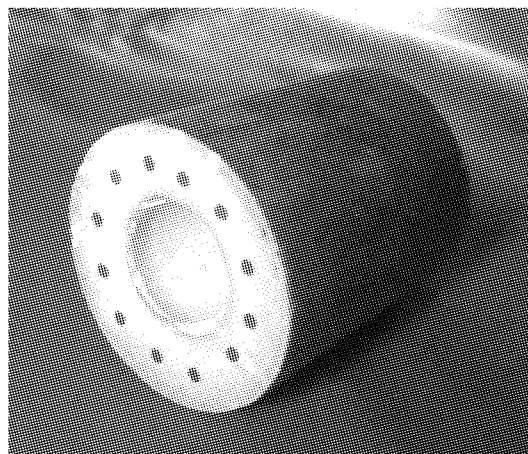


Рис. 2. Нижний торец керамического наконечника со световодами

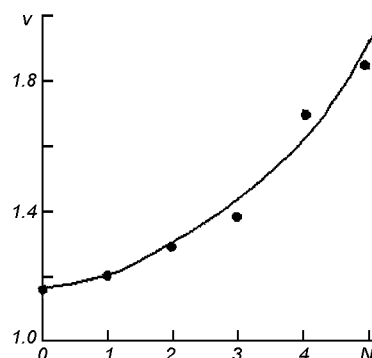


Рис. 3. Увеличение ударной вязкости  $v$  керамики при увеличении числа  $N$  световодов в поперечном сечении наконечника

Согласно технологическому процессу и техническим условиям в каждой партии из пяти изделий были определены прочность при изгибе (51—65 МПа) и плотность (1.91—2.00 г/см<sup>3</sup>). Значения прочности при изгибе для армированной и неармированной керамики примерно одинаковые (65 и 67 МПа соответственно). Как показали результаты механических испытаний, ударная вязкость изделий увеличивается примерно в 1.6 раза при изменении количества световодов в поперечном сечении образца от 0 до 5 штук (рис. 3). Значение модуля упругости

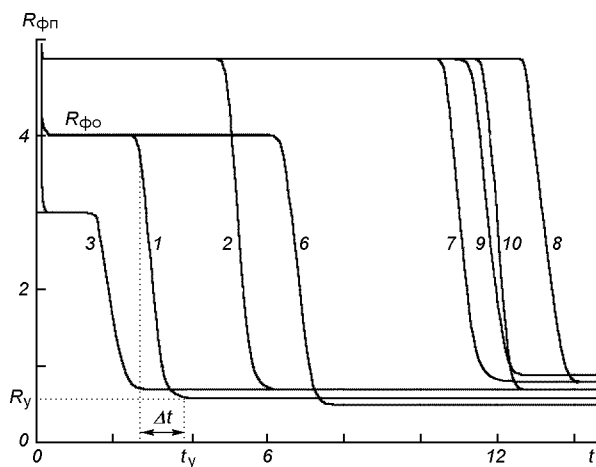


Рис. 4. Изменение фотосопротивления  $R_{фп}$  приемника при уносе массы керамического наконечника (1...10 — номера световодов с пленкой родия на торце;  $\Delta t$  — время стабилизации сигнала датчика;  $t_y$ ,  $R_y$  — факторы, определяющие момент уноса слоя ТЗМ;  $R_{фо}$  — «фоновый» уровень фотосопротивления, обусловленный полупрозрачностью ниасита

(3580—3730 кг/мм<sup>2</sup>) остается на уровне неармированной керамики. Испытания по определению несущей способности наконечника со световодами проводились в соответствии со схемой нагружения реального наконечника. Нагружение производилось плавным увеличением силы от 0 до 4400 Н и далее до разрушения конструкции. Для трех образцов разрушение происходило в сечении, которое совпадает с глубиной заделки «пальца», при нагрузках 5490—7350 Н. Запас прочности изделия с датчиками находится в пределах 1.22—1.66, что соответствует запасу прочности для натурального наконечника.

Диэлектрические свойства армированной световодами кварцевой керамики определялись на установке «Кварц» и составили при комнатной температуре: диэлектрическая проницаемость — 3.34—3.39; тангенс угла диэлектрических потерь менее 5, что соответствует значениям этих параметров для неармированной керамики. С увеличением температуры до 1473 К величина диэлектрической проницаемости увеличивается до 3.54, а тангенс угла диэлектрических потерь — до 105. Результаты рентген-контроля свиде-

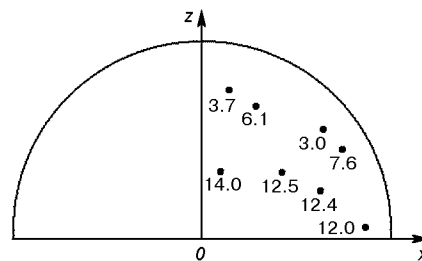


Рис. 5. Расположение торцов световодов, покрытых пленкой родия, и время  $t_y$  «срабатывания» датчиков ( $z$ ,  $x$  — ось и радиус наконечника)

тельствуют об отсутствии дефектов структуры материала наконечника и о его монолитности.

В настоящее время это практически единственный способ изготовления керамического наконечника вместе с оптическими датчиками уноса, обеспечивающий сохранение состава, структуры, целостности и однородности теплозащитного материала (ТЗМ), не требующий специальной механической обработки изделия после его изготовления. При установке металлических датчиков в процессе спекания изделия происходит образование трещин вследствие различия коэффициентов термического расширения материала датчика и ниасита, что резко снижает прочностные свойства изделия.

Определение координат торцов световодов, покрытых пленкой родия и расположенных в зоне уноса материала наконечника, осуществлялось с помощью рентген-контроля с точностью 0.4 мм. Для этого вершина наконечника отрезалась, а затем исследовалась (рис. 1). Наличие кварцевых световодов  $\varnothing 1$ —1.2 мм не оказывает практически никакого влияния на разрушение керамики (ниасита) в местах расположения датчиков. Вибрации, прогрев наконечника, а также наличие стыка модель-державка в месте расположения фотоприемников не оказывают влияния на целостность и герметичность «ответной» части датчика; температура фотоприемников (по показаниям термокраски) — в норме. Темп увеличения светового сигнала на фотоприемник (рис. 4) при выходе торца световода, покрытого пленкой родия, на разрушаемую поверхность ТЗМ составляет более 2000 Ом/с ( $P_0 = 11$  МПа,  $T_0 = 3100$  К,  $q = 4.2$  кВт/м<sup>2</sup>).

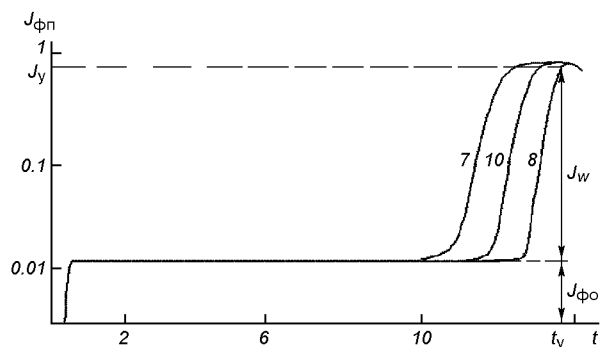


Рис. 6. Изменение потока  $J_{\text{фп}}$  на приемник для датчиков № 7, № 8, № 10 при уносе наконечника

Фотосопротивления уменьшаются (по отношению к «фоновому» сигналу, обусловленному полупрозрачностью керамики) более чем в четыре раза. Флуктуации величины фотосопротивления  $\delta R_{\text{ср}}$  во времени ( $t$ ) не превосходят 3 %. Результаты обработки данных по уносу наконечника, полученных с помощью восьми дискретных датчиков, представлены на рис. 5, где координаты расположения торцов световодов условно приведены в одну плоскость и размещены по одну сторону от оси конуса. Рядом с координатой указано время срабатывания соответствующего датчика.

На основе данного результата, была предложена методика, которая позволяет определять лучистый поток на поверхность ТЗМ:  $J_w(t) \neq \text{const}$  при конвективном нагреве, используя для этого «внутренние» световоды разной длины, верхние торцы которых покрыты светозащитной пленкой родия, имеющей температуру плавления 2300 К.

При значительных скоростях уноса ТЗМ, когда вследствие резкого профиля температуры в ТЗМ величина теплового излучения торца световода  $J_{\text{св}} \ll J_w$ , происходит резкий скачок амплитуды сигнала датчика после уноса пленки родия (рис. 6). Приращение лучистого потока на фотоприемнике:  $J_{\text{фп}} = (J_y - J_{\text{фо}})/\tau$ . Здесь  $J_{\text{фо}}$  — фоновый поток на фотоприемнике, возникающий из-за полупрозрачности ниасита, а  $J_y$  — поток на приемнике после уноса родия,  $\tau$  — коэффициент пропускания световода. Учитывая величину флуктуаций сигнала датчика при оплавлении торца световода ( $\leq 3\%$ ) и точность

энергетической характеристики фотоприемника (10 %), приведенной к максимальной чувствительности фотоприемника  $\lambda_m = 0.78$  мкм, погрешность определения  $J_w$  можно ограничить величиной 15 %. Чувствительность фотоприемника позволяет оценивать  $J_w$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 0.4 \dots 1.0$  мкм.

Для определения величины  $q_r$  на поверхности кварцевого конуса по измеренному значению  $J_y$  была применена следующая методика. Предварительно при испытаниях датчика РТП со «сквозным» кварцевым световодом 1 мм на установке лучистого нагрева «Уран» в диапазоне  $q_r = 400 \dots 800$  Вт/см<sup>2</sup> была получена следующая зависимость [2]:

$$J_w = 0.0142q_r. \quad (1)$$

При этом значение интенсивности собственного теплового излучения «сквозного» кварцевого световода определялось путем механического модулирования падающего потока  $q_r$ .

Результаты измерений, проведенных при испытаниях кварцевого конуса с датчиками на газогенераторе, дали величину  $J_w = 1.19$  Вт/см<sup>2</sup>, чему, согласно (1), должно соответствовать значение  $q_r = 83$  Вт/см<sup>2</sup>. Вершина керамического конуса с расположенными в ней световодами  $\varnothing 1$  мм находилась на расстоянии 2 см от выхлопного среза газогенератора. Спектр излучения углеводородного топлива близок к спектру излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Расчет плотности потока излучения АЧТ на  $\lambda_m = 0.78$  мкм при температуре, равной температуре газа ( $T_e = 3100$  К), дал значение  $q_{\text{рАЧТ}} = 100$  Вт/см<sup>2</sup>, что, естественно, несколько больше величины, измеренной датчиком. Такой метод диагностики РТП эффективен при больших значениях скорости уноса ТЗМ.

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны конструкция и способ изготовления керамического наконечника с оптическими датчиками РТП и уноса массы. Сохранены структура, целостность, плотность, радиопрозрачность, прочностные характеристики и увеличена ударная вязкость материала наконечника, исключено влияние датчика на разрушение теплозащиты.

2. Проведена оценка радиационного теплового потока и величины уноса массы штатного накопчика из ниасита в условиях, близких к эксплуатационным.

1. Горностаев Г. Ф. Волоконно-оптические датчики и перспективы их использования в космической программе Украины // Космічна наука і технологія.—1996.—2, № 3/4.—С. 88—94.
2. Горностаев Г. Ф., Теплякова О. А. Применение световодов для выделения лучистой составляющей теплового потока // Порошковая металлургия.—1996.—№ 5/6.—С. 48—51.
3. Цикулин М. А., Попов Е. Г. Излучательные свойства ударных волн в газах. — М.: Наука, 1977.—176 с.

#### A METHOD FOR MEASUREMENT OF THE RADIATION COMPONENT OF THERMAL FLOW AT CERAMIC HEAT-INSULATION SURFACE

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

As a result of our investigation of thermal selfradiation of the «through» optical fiber installed into heat-insulation material, we obtained the calibrated dependence for the sensor of radiant thermal flow. A technology is developed for manufacturing ceramic tip equipped with optical fiber sensors. It is established that the tip impact strength increases essentially when quartz ceramics is reinforced with quartz optical fibers. The ablation depth and radiant thermal flow at ablating surface are determined with the help of the sensors.