

УДК 536.3:681.586.5

Г. Ф. Горностаев

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

Волоконно-оптические датчики уноса теплозащиты

Надійшла до редакції 22.06.07

Представлено результати розробки, випробувань і застосування (при стендових дослідженнях теплозахистних матеріалів) світловодних датчиків лінійного виносу теплозахисту. Описано конструкції датчиків, призначених для НПО «Енергія» і КБ «Новатор» (Росія) та методику вимірювань на них. Розроблено технологію виготовлення керамічного наконечника, оснащеного світловодними датчиками виносу. Датчики випробовувалися для параметрів: $P_e = 0.04 \dots 11$ МПа, $T_e = 1100 \dots 5000$ К, $q = 1.6 \dots 42$ МВт/м², $V_y = 0.2 \dots 2$ мм/с, $T_w = 600 \dots 2400$ К.

ВВЕДЕНИЕ

Для получения экспериментальных данных об изменении толщины теплозащитного покрытия головной части космического аппарата (КА) при входе в плотные слои атмосферы КА снабжаются датчиками уноса теплозащиты [5, 6]. Эти датчики используются также при стендовой отработке новых теплозащитных материалов.

Ниже представлены результаты наших разработок, испытаний и применения при стендовых испытаниях волоконно-оптических датчиков (ДУМ) уноса теплозащитного материала (ТЗМ), что является актуальной задачей совершенствования измерительных средств экспериментальной обработки ТЗМ для объектов космической техники (КТ) при летных и стендовых испытаниях. Подробно излагается методика измерений и анализ погрешности при применении ДУМ [3].

Достоверность и новизна подтверждается стендовыми испытаниями с моделированием реальных полетных тепловых и аэродинамических нагрузок на ТЗМ, в результате которых получена более высокая точность контроля уноса ТЗМ из различных материалов, чем при применении других типов датчиков ДУМ (ультразвуковых,

радиоактивных и др.) [5, 6]. Это позволяет получить более достоверные результаты при летных и стендовых испытаниях ТЗМ, что в итоге позволит повысить надежность объектов КТ.

Практическая ценность приведенных материалов подтверждается использованием разработанных датчиков при испытаниях ТЗМ на ведущих предприятиях космических отраслей Украины и России.

Разработка датчиков выполнялась по заказам КБ «Южное», а также предприятий Российской Федерации: НПО «Энергия», ЦКБМ, МИТ, НИИ ТП, КБ «Новатор».

ДАТЧИК ДЛЯ ИЗДЕЛИЯ «МАРС-5» (НПО «ЭНЕРГИЯ»)

Световоды из плавленого кварца $\varnothing 1$ мм вклеивались в отверстия $\varnothing 1.1$ мм (рис. 1). Фотоголовка с фотоприемниками СФЗ-1 крепилась к образцу снизу на центрирующих штырях. Термостабилизация фотоприемников осуществляется с помощью $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, имеющего температуру плавления 30°C и удельную теплоту плавления $r = 0.29$ МДж/кг. Термостабилизация

способствует сохранению уровня собственных шумов и постоянных времени, которые зависят от температуры чувствительного слоя фотоприемника. В высокотемпературных материалах (АСД, СТКТ-11, ТЗМКТ-8, СТКТ-НА) устанавливались кварцевые световоды, а в низкосублимирующих материалах (ТП-41К, ТТПС-15)

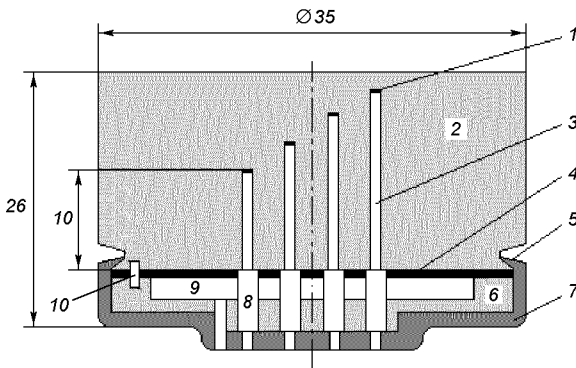


Рис. 1. Датчик уноса для НПО «Энергия»: 1 — пленка родия на торце световода, 2 — ТЗМ ТТПС-15, 3 — световод, 4 — крышка, 5 — место вальцовки, 6 — текстолитовая втулка, 7 — металлический корпус, 8 — фотоприемник, 9 — полость с $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 10 — центрирующий штырь

— стеклянные. В каждом образце было установлено по четыре световода на различном расстоянии от обогреваемой поверхности материала.

Разработка методики измерений. Для определения момента выхода верхнего торца световода на разрушаемую поверхность проведено специальное исследование. Было установлено по два световода: один световод — сквозной, другой — «внутренний», его входной торец расположен на известном расстоянии h от нагреваемой поверхности ТЗМ. Результаты испытаний таких датчиков на газодинамическом стенде свидетельствуют о том, что характер изменения световых потоков на выходе указанных световодов не зависит от режима нагрева ($q = 6.7... 17.6 \text{ МВт/м}^2$). Световой поток от «внутреннего» световода $J_{\text{вс}}$ плавно увеличивается и достигает уровня потока $J_{\text{сск}}$ от сквозного световода, а затем стабилизируется на этом уровне:

$$J_{\text{сск}} - J_{\text{вс}} \rightarrow 0, \text{ если } h \rightarrow 0.$$

Таким образом, значение фотосопротивления $R_{\text{ср}}$, соответствующее моменту выхода торца «внутреннего» световода на разрушаемую поверхность ТЗМ, можно оценить по величине фотосопротивления, расположенного под сквозным световодом (табл. 1).

Таблица 1. Значения измерения $R_{\text{ср}}$ датчиков со сквозными световодами на стендах конвективного и радиационного нагрева

Стенд	Условия нагрева			ТЗМ	$R_{\text{ср}}$, кОм	Материал и длина световода
	q , МВт/м ²	P_e , МПа	T_e , К			
Газогенератор	0.9	1.05	1100	ТТПС-15	16.0	Стекло, $L = 40$ мм
	1.2	1.06	1200		6.5	
	3.3	1.1	1500		4.0	
СГУ-4 Газогенератор	9.2	—	—	ТП-41 К	1.3	Стекло, $L = 40$ мм
	0.9	1.05	1100		14.0	
	1.2	1.06	1200		6.0	
«Уран»	3.3	1.1	1500	ТП-41 К	3.3	Стекло, $L = 40$ мм
	5	—	—		2.0	
	6	—	—		1.0	
Газогенератор	7	—	—	АСД	0.5	Кварц, $L = 40$ мм
	5.5	1.3	1800		2.6	
	10	1.9	2500		1.0	
Газогенератор	17.6	3.5	3100	СТКТ-11	0.70	Кварц, $L = 40$ мм
	5.5	1.3	1800			
	10	1.9	2500			
«Уран» Газогенератор	17.6	3.5	3100	Ниясит	0.35	Кварц, $L = 190$ мм
	6.3	—	—		0.70	
	42	110	3100			

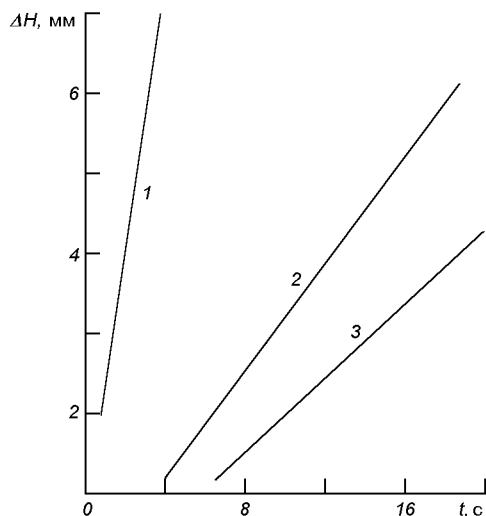


Рис. 2. Значения уноса ΔH для высокотемпературных ТЗМ, полученные на различных газодинамических стендах с помощью волоконно-оптических датчиков: 1 — ТЗМ КТ-8, $q = 27 \text{ МВт/м}^2$, $P_e = 1.8 \text{ МПа}$, $T_e = 5500 \text{ К}$; 2 — ТЗМ АСД, $q = 7.6 \text{ МВт/м}^2$, $P_e = 0.17 \text{ МПа}$, $T_e = 2300 \text{ К}$; 3 — ТЗМ УП-УТ-П, $q = 12 \text{ МВт/м}^2$, $P_e = 0.23 \text{ МПа}$, $T_e = 2600 \text{ К}$

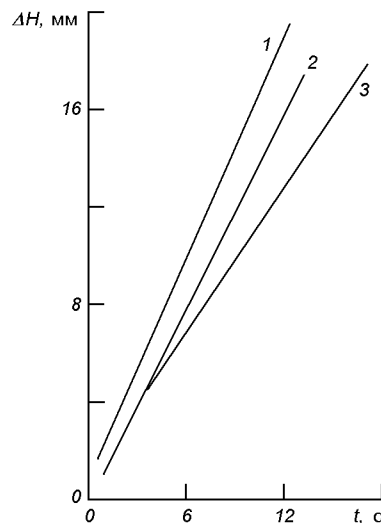


Рис. 3. Значения уноса ΔH для низкосублимирующих ТЗМ, полученные на различных газодинамических стендах с помощью волоконно-оптических датчиков: 1 — ТЗМ ТП-41К, $q = 3.3 \text{ МВт/м}^2$, $P_e = 0.11 \text{ МПа}$, $T_e = 1500 \text{ К}$; 2 — ТЗМ ТПС-15, $q = 3.3 \text{ МВт/м}^2$, $P_e = 0.11 \text{ МПа}$, $T_e = 1500 \text{ К}$; 3 — фторопласт-4, $q = 12 \text{ МВт/м}^2$, $P_e = 0.23 \text{ МПа}$, $T_e = 2600 \text{ К}$

Это обстоятельство значительно сократило продолжительность стендового эксперимента по определению величины R_{cp} для различных классов ТЗМ и режимов их нагрева.

Считая, что момент стабилизации сигнала внутреннего световода соответствует выходу его торца на разрушаемую поверхность материала по показаниям датчиков построены графики линейного уноса различных ТЗМ (рис. 2, 3). Световоды не оказывают влияние на разрушение поверхности ТЗМ.

Анализ погрешностей. Чтобы исключить влияние проникающего через полупрозрачный слой ТЗМ внешнего радиационного потока на точность измерения уноса, входные торцы и часть боковой поверхности световодов были покрыты светозащитной пленкой родия, обладающей отличными отражательными, механическими свойствами и термостойкостью. После отжига в аргоне при температуре 970 К пленка Rh уплотняется до толщины 4...7 мкм.

Для оценки времени разрушения (уноса) пленки родия были проведены испытания датчиков со сквозными светозащищенными световода-

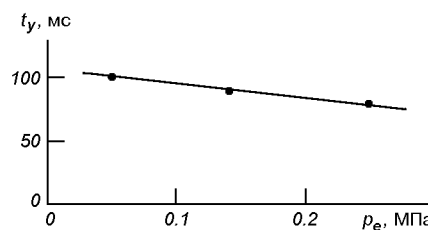


Рис. 4. Время t_y уноса пленки родия на торце световода в зависимости от давления торможения P_e струи газогенератора (ТЗМ СТКТ-11)

ми на газодинамическом стенде. Фиксировалось время t_y , через которое происходило срабатывание регистрирующего порогового триггерного блока (ПСД-10). Результаты испытаний (рис. 4) свидетельствуют о том, что срабатывание ПСД-10 при соответствующем данному тепловому потоку пороговом значении фотосопротивления R_{cp} происходило не позже, чем через 0.1 с после начала нагрева. Источником светового сигнала являлось внешнее излучение, которое воздей-

вовало на фотоприемник после уноса пленки родия.

Надежность работы датчиков оценивалась по количеству непоследовательных («ложных») срабатываний единичных датчиков по отношению к их общему числу (20 для каждого из ТЗМ). При «шаге» заделки торцов световодов 1 мм практически во всех испытанных образцах срабатывание дискретных единичных датчиков происходило последовательно, т. е. в том порядке, в котором располагались торцы световодов относительно нагреваемой поверхности ТЗМ. Высокая надежность срабатывания ДУМ при вклеивании «пробки» с датчиками в отверстие на теплозащите подтверждена испытаниями датчиков из ТЗМ ТП-41К и ТТПС-15 в струях двух газогенераторов с параметрами: 1) $q = 3 \text{ МВт/м}^2$, $P_e = 0.2 \text{ МПа}$, $T_e = 6800 \text{ К}$; 2) $q = 1.6 \text{ МВт/м}^2$, $P_e = 40 \text{ кПа}$, $T_e = 3000 \text{ К}$.

Флуктуация светового сигнала на выходе сквозного световода вносит некоторую неопределенность в выбор величины R_{cp} . При значении R_{cp} , равном среднему значению величины сопротивления фотоприемника $R_{фп}$ [$J_{cc}(h=0)$], ошибка δR_{cp} составляет (по результатам экспериментов на газодинамическом стенде) для материалов ТП-41 К, СТКТ-11, ТТПС-15, АСД не более 3 % ($q \leq 17.6 \text{ МВт/м}^2$).

Погрешность, обусловленная конечной шириной зоны переброса преобразователя сигнала датчика ПСД-10, срабатывающего при $R_{фп} = R_{cp}$, составляет 3 %. Существенная доля в погрешности измерения линейного уноса ТЗМ дискрет-

ным ДУМ принадлежит точности заделки торцов световодов на заданном расстоянии от нагреваемой поверхности ТЗМ. Погрешность рентген-контроля координат торцов световодов, покрытых пленкой Rh, составила 0.4 мм.

На газодинамическом стенде ИПМ НАНУ погрешность дискретного ДУМ определялась по следующей методике. В момент срабатывания блока ПСД-10 его выходной сигнал (6 В) через реле включал пневмоэлектрклапан двойного действия, который управляет системой ввода-вывода державки из струи. После вывода образца с датчиком из струи проводился линейный замер образца. Ошибка δH определения толщины унесенного слоя ТЗМ единичным датчиком оценивалась по средней скорости V_y уноса ТЗМ путем сравнения начальной и конечной (после прекращения нагрева) длины световода (L_n и L_k):

$$\delta H = V_y \Delta t_{ин} - (L_n - L_k), \quad (1)$$

где $\Delta t_{ин}$ — инерционность системы ввода-вывода державки.

В реальной ситуации на стенде всегда соблюдается неравенство $1 \text{ с} \geq t_{ин} > 0$. Параметр $V_y \Delta t_{ин}$ равен толщине унесенного слоя ТЗМ после срабатывания блока ПСД-10. Если $\Delta t_{ин} = 0$, тогда $\delta H = -(L_n - L_k)$. При $L_n > L_k$ срабатывание блока ПСД-10 произошло после выхода торца световода на уносимую поверхность ТЗМ, т. е. $\Delta H < 0$, а при $L_n = L_k$ погрешность $\delta H = 0$. В случае, когда срабатывание блока ПСД-10 произошло до выхода торца световода на уносимую поверхность ТЗМ (при $\Delta t_{ин} = 0$) вместо формулы (1)

Таблица 2. Значения уноса ТЗМ и погрешность срабатывания датчиков на газодинамических стендах различных предприятий

Предприятие	Режим нагрева			ТЗМ	V_y , мм/с	$ \Delta H $, мм
	q , МВт/м ²	P_e , МПа	T_e , К			
ИПМ НАНУ	3.3	0.11	1500	ТП-41К	1.3	0.4
	3.3	0.11	1500	ТТПС-15	1.1	0.4
	6.7	0.15	2200	АСД	0.32	0.5
	7.6	0.17	2300	АСД	0.36	0.5
	12.0	0.23	2600	УП-УТ-П	0.2	0.8
	17.6	0.35	3100	АСД	0.48	0.5
НПО «Энергия» (Россия)	1.6	0.04	3000	ТП-41К	0.5	0.4
	1.6	0.04	3000	ТТПС-15	0.4	0.4
НИИ ТП (Россия)	27	1.8	5000	ТЗМ КТ-8	2.0	0.5
Воткинский машзавод (Россия)	42	11	3100	Нисит	0.98	0.5

пользуются сравнением результатов линейного замера образца после испытаний с известной длиной световода L_n .

В табл. 2 представлены результаты измерений уноса и погрешность датчиков.

ДАТЧИКИ ДЛЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ (НИИ ТП, ЦКБМ)

На газодинамической установке предприятия НИИ ТП (Россия) были проведены измерения уноса материала ТЗМ КТ-8. Параллельный контроль за величиной уноса материала осуществлялся с помощью кино съемки (1 кадр в секунду). Условия испытания были следующими:

$$q = 27 \text{ МВт/м}^2, P_e = 1.8 \text{ МПа}, T_e = 5500 \text{ К.}$$

Результаты обработки данных кино съемки свидетельствуют, что кварцевые световоды и ТЗМ уносятся с одинаковой скоростью, световоды не влияют на разрушение нагреваемой поверхности, погрешность измерения линейного уноса материала датчиками равна 0.5 мм (рис. 2, табл. 2).

По заказу ЦКБМ для изделий этого предприятия была разработана оригинальная технология [4] изготовления штатного наконечника из объемного стеклопластика трехмерного плетения марки «Куб», оснащенного волоконно-оптическими ДУМ с диаметром кварцевого волокна 0.1 мм. Технология изготовления наконечника освоена на предприятии НИИ СПВ (РФ). Датчики устанавливаются в материал наконечника в процессе его формования.

ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗДЕЛИЯ «СТРЕЛА-2» (КБ «НОВАТОР»)

Известна технология [2] изготовления деталей управляемых снарядов с использованием кварцевого стекла.

По заказу КБ «Новатор» были разработаны конструкция и технология изготовления наконечника из кварцевой керамики (ниасита), оснащенного волоконно-оптическими ДУМ в процессе формования теплозащиты [4]. Технологический процесс формования наконечника вместе с кварцевыми световодами ($\varnothing 1...1.2$ мм) включает следующие операции:

— формование;
— сушка и обжиг, механическая обработка, сборка.

Наконечник со световодами представляет собой конус, внутри которого расположены 10 световодов длиной 170—185 мм и установочный световод длиной 15 мм. По торцу изделия ОТИ-2252 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. Набор заготовки происходит путем осаждения шликера на гипсовую поверхность формы, полностью повторяющую наружную поверхность заготовки. Затем форма для наконечника разбирается, а заготовка подсушивается, дает небольшую усадку и легко выходит из формы. 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 не более 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 свидетельствуют об отсутствии дефектов структуры материала наконечника и о его монолитности. В табл. 3 приведены результаты измерений физических свойств наконечника со световодами.

Таблица 3. Результаты измерения физических свойств ниасита, армированного кварцевыми световодами $\varnothing 1.2$ мм

Плотность, г/см ³	Прочность при изгибе, МПа	Ударная вязкость, Н·м/см ²	Модуль упругости, кг/мм ²	Запас прочности изделия	Разрушающее усилие, Н
1.91—2.0	51—65	11.27—18.13	3580—3730	1.22—1.66	5490—7350

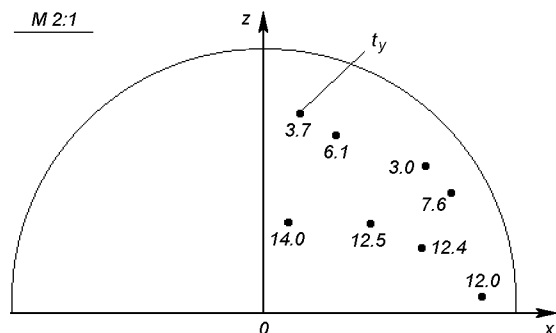


Рис. 5. Расположение торцов световодов, покрытых пленкой родия, и время t_y срабатывания соответствующего датчика (z , x — ось и радиус наконечника)

Втулка с фотоприемниками наглухо посажена на металлический «палец». Распайка СФЗ-1 на экранированный электрический кабель, расположенный внутри пальца, изолирована и залита эпоксидной смолой. С целью защиты чувствительной поверхности фотоприемника от проникающего через керамику внешнего излучения, нижняя торцевая поверхность наконечника вокруг световодов была зачернена графитом.

На газодинамическом стенде РМ-2 предприятия Воткинский машзавод (Россия) с помощью датчиков были получены данные по уносу керамического наконечника в следующих условиях нагрева: $P_e = 11$ МПа, $T_e = 3100$ К, $q = 42$ МВт/м².

Результаты обработки данных по уносу наконечника, полученных с помощью восьми дискретных датчиков, представлены на рис. 5, где координаты расположения входных торцов световодов условно сведены в одну плоскость и размещены по одну сторону от оси конуса. Рядом с координатой указано время срабатывания соответствующего датчика.

Данные кино съемки свидетельствуют, что точность измерения линейного уноса датчиками составила 0.5 мм (табл. 2). Нет влияния кварцевых световодов на разрушение материала (ниасита) в местах установки датчиков.

На изделиях предприятия КБ «Новатор» (Россия) используются кварцевые наконечники из ниасита следующей конструкции: высота конуса — 190 мм; радиус затупления носка — 20 мм.

ВЫВОДЫ

1. Разработана конструкция дискретного ДУМ для полупрозрачных ТЗМ, которая обеспечивает его работоспособность независимо от оптических свойств ТЗМ и наличия химически активного углерода в коксовом слое материала. Сравнительно низкая теплопроводность световодов делает незначительными перетечки тепла по датчику вглубь ТЗМ.

Точность контроля уноса высокотемпературных ТЗМ волоконно-оптическим ДУМ (табл. 2) превосходит точность ультразвукового (1.27 мм) и радиоактивного (2.8 мм) датчиков, в углепластике его точность 0.8 мм превосходит точность термпарного датчика (1.5 мм), а в стеклопластике он дает вдвое меньшую ошибку (0.5 мм), чем радиотехнический ДУМ (1.0 мм). В сублимирующем ТЗМ волоконно-оптический ДУМ позволяет контролировать унос с точностью 0.4 мм и практически не имеет конкурентов.

По сумме рассмотренных признаков волоконно-оптические ДУМ являются наиболее предпочтительными при исследовании кварцевой керамики, сублимирующих ТЗМ, асбо-, стекло- и, по-видимому, углепластика.

2. Впервые создано рабочее средство для контроля уноса наконечника из кварцевой керамики, которое практически идеально сочетается с материалом изделия. Технология изготовления наконечника с ДУМ позволяет сохранить основные свойства (структуру, целостность, прочность, радиопрозрачность, плотность) изделия, увеличить его ударную вязкость. Выходной сигнал датчика уноса легко согласуется с измерительной системой борта. Технологический процесс изготовления наконечника с ДУМ освоен в опытном производстве предприятия НПО «Технология» (РФ); наконечники признаны годными для комплектации изделия 63Т6 предприятия КБ «Новатор» (РФ).

3. Результаты стендовых испытаний дискретных ДУМ при конвективном нагреве в ИПМ НАНУ, Воткинском машзаводе (РФ), НИИ ТП (РФ), НПО «Энергия» (РФ) свидетельствуют, что волоконно-оптические датчики позволяют измерять унос широкого класса теплозащитных материалов и не оказывают существенного влияния на разрушение исследуемых ТЗМ. В результате применения датчиков при стендовых

испытаниях получены данные о скорости уноса различных классов теплозащитных материалов.

1. А. с. 236516 СССР. МКИ² G 01 N 25/38. Оптоэлектронный преобразователь термоэрозии материала / Г. Ф. Горностаев, И. Н. Францевич, В. С. Дверняков и др.; Заявл. 05.05.86; Опубл. 00.00.86, Бюл. № 6.
2. Валтон Д. Применение кварцевого стекла для изготовления деталей управляемых снарядов // Век керамики (США).—1960.—№ 10.—С. 33—37.
3. 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.
4. 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.
5. Грабовский В. Р. Приборно-измерительное оборудование спускаемых аппаратов // Экспресс-информ. Астронавтика и ракетодинамика.—1983.—№ 8.—С. 11—21.

6. Слезингер И. И. Аппаратура для испытаний носовых частей баллистических ракет при входе в плотные слои атмосферы // Экспресс-информ. Испытательные приборы и стенды.—1978.—№ 23.—С. 17—31.

OPTICAL FIBER SENSORS FOR HEAT-PROTECTION ABLATION

G. F. Gornostaev

We present some results of the development, tests and application (by the stand investigation of HIM) of optical fiber sensors of heat-insulation materials linear ablation. The methods for measuring and the design of the sensors for the NPO «Energia» and KB «Novator» (Russia) are described. The technology for manufacturing the ceramic tip equipped with optical fiber ablation sensors is developed. The range of the measurement of the parameters of the sensors which were tested is: $P_e = 0.04...11$ MPa, $T_e = 1100...5000$ K, $q = 1.6...42$ MW/m², $V_y = 0.2...2$ mm/s, $T_w = 600...2400$ K.