

УДК 681.586.5

Волоконно-оптические и перспективы их использования в космической программе датчики Украины

Г. Ф. Горностаев

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

Надійшла до редакції 27.02.96

Приведені принципи побудови і переваги волоконно-оптических датчиків фізичних величин. Представлено результати створення датчиків для дослідження теплозахисних матеріалів та технологій їх виготовлення разом з датчиками. Пропонуються різні варіанти використання волоконно-оптических датчиків в існуючих проектах космічної програми України.

Области применения световодных датчиков и сенсорных устройств непрерывно расширяются. Ориентировочные данные и прогнозы об увеличении объемов производства световодных датчиков в 1990—2000 гг. по данным фирмы «Электроникаст Корпорейшн» (Красюк и др., 1990) приведены на диаграммах (рис. 1). Для широкого развития промышленного производства световодных датчиков и сенсорных устройств большое значение имеет то обстоятельство, что их изготавливают в основном на той же элементной базе, что и волоконно-оптические системы связи.

Оптический носитель сигнала по сравнению с носителями неоптической природы обладает большим числом степеней свободы. Это следующие характеристики: интенсивность, частота, поляризация, фаза, скорость, направление распространения. Эти степени свободы оптического излучения используются для передачи и преобразования информации за счет прямой модуляции, поскольку при распространении оптических волн через прозрачную среду или при рассеянии, любая из этих характеристик света или все изменяется. Наблюдение и анализ этих изменений позволяют формировать информацию о состоянии среды или объекта

(его форме, размерах, направлении и скорости перемещения, температуре, плотности, наличии напряжений в нем и т. д.). Процесс взаимодействия оптического сигнала с волоконными структурами может быть охарактеризован опосредованной модуляцией — дополнительными степенями свободы (пространственными, временными, модовым составом, конвергенцией мод, пространственной поляризацией света после выхода из волокна и т. д.). Эти динамические характеристики оптического излучения могут быть использованы для получения информации о внешних физических полях (оптической и неоптической природы), действующих на материально-конструктивные характеристики световодов.

В отличие от оптических волн, характеризующихся сверхвысокими частотами, все другие физические (неоптической природы) экзозвоздействия на волоконные световоды являются, как правило, низкочастотными, включая статические (0-частотные) поля. В общем случае в линейном приближении колебания и волны разной природы не взаимодействуют. Это может быть использовано при создании датчиков, в которых носителем информации являются различные физические поля, частицы и излу-

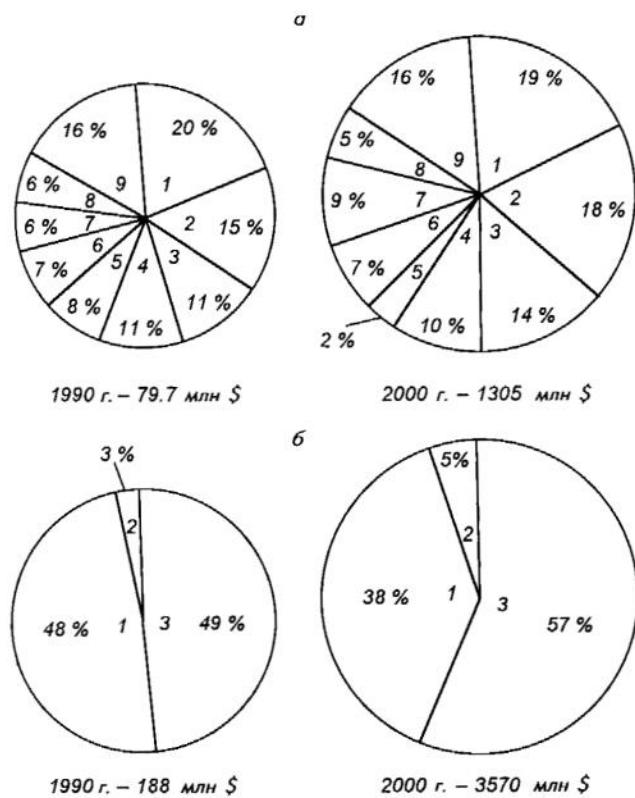


Рис. 1. Диаграммы объема производства световодных датчиков различного назначения: а — датчики с амплитудной модуляцией (1 — химические; 2 — температурные; 3 — уровня жидкости и скорости потока жидкости или газа; 4 — давления; 5 — радиации; 6 — местонахождения объектов и значений их взаимных смещений; 7 — акустические; 8 — электрических и магнитных полей; 9 — прочие); б — интерферометрические датчики (1 — для систем управления и регулирования; 2 — для систем и устройств локации; 3 — для измерения интенсивности магнитных полей и прочих)

чения неоптической природы. В этом случае на выходе волоконного канала могут использоваться визуализаторы информации различного принципа действия (Марков и др., 1987).

В разных датчиках физических величин и полей неоптической природы применяется функционально различное использование волоконных световодов:

- весь квазидномерный объем волокна может являться преобразующим (чувствительным) элементом;
- часть световода используется как чувствительный участок, а остальная часть используется для подвода и (или) вывода оптического сигнала;
- волоконный световод используется только для передачи света к чувствительному элементу.

Повышение эффективности работы волоконно-оптических датчиков возможно только на основе волокон, специально разработанных для конкретных целей. Можно выделить (Бусурин, Носов, 1990) три основных направления развития методов разработки компонентов волоконно-оптических датчиков (источников излучения, модуляторов, фильтров, переключателей и т. д.): применение микрооптических элементов (линз или граданов); использование элементов интегральной оптики — полосковых световодов; создание устройств, полностью интегрированных на оптическом волокне.

К достоинствам волоконно-оптических датчиков (Бутусов и др., 1987) следует отнести высокие метрологические характеристики, высокую надежность, долговечность, стабильность; малые габариты, массу и энергопотребление; совместимость с микроэлектронными устройствами обработки информации и волоконно-оптическими линиями связи при низкой трудоемкости изготовления и небольшой стоимости. Они оказываются конкурентоспособными и в тех случаях, когда необходимо обеспечить работу в сильных электромагнитных полях, в агрессивных, взрывоопасных и пожароопасных средах; при необходимостистыковки с процессорами оптических компьютеров (Окоси и др., 1990). В ряде случаев весьма ценными оказываются также такие их свойства, как высокая влаго- и термостойкость; низкая теплоемкость, тепло- и электропроводность; химическая инертность; возможность работы в труднодоступных местах; малая постоянная времени (Верещагин и др., 1991).

Рассмотрим возможности использования волоконно-оптических датчиков с амплитудной модуляцией для исследования характеристик и параметров взаимодействия высокотемпературных материалов с газовыми потоками. Представим высокотемпературную 2-фазную систему с движущейся вниз границей раздела фаз (рис. 2), в которой установлен блок световодов (I' , I , II , III) с определенными теплофизическими свойствами и заданными оптическими характеристиками при различном положении H световоспринимающих торцов относительно границы раздела фаз. При этом положение торцов световодов обусловлено следующим соотношением температуры плавления материала световода T_n и температуры на границе раздела фаз T_w :

$$T_n \approx T_w \text{ для первого и второго световодов;}$$

$$T_n > T_w \text{ для третьего световода.}$$

I. Экспериментальным путем (Горностаев и др., 1980б) установлено, что независимо от интенсивности внешнего излучения справедливо следующее

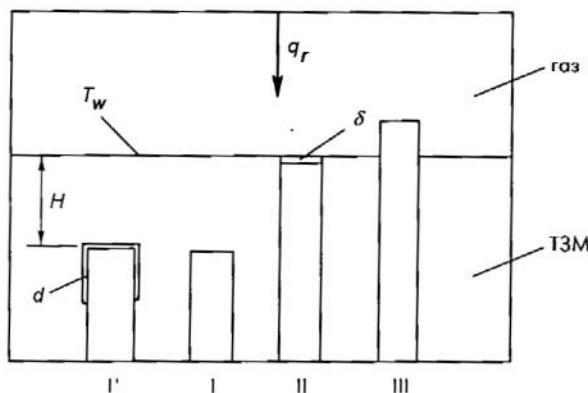


Рис. 2. Двухфазная система со световодами: I, I', II, III — световоды; а — пленка родия; б — пленка расплава стекла; q_r — лучистый тепловой поток

соотношение для световых потоков J на выходе I и II световодов (рис. 2):

$$\lim_{H \rightarrow 0} [J_I / J_{II}] = 1.$$

Таким образом, установив один сквозной световод и несколько «внутренних» световодов на разных расстояниях H от границы раздела фаз, можно по моменту выравнивания их выходных световых сигналов дискретно определять унос теплозащитного материала (ТЗМ) при изменяющихся внешних условиях.

Для исследования уноса полупрозрачных материалов с целью более четкой регистрации момента выхода торца «внутреннего» световода на поверхность раздела фаз применялись световоды I', на верхние торцы которых по специальной технологии была нанесена тонкая (менее 20 мкм) пленка родия а. По экспериментальным оценкам время уноса этой пленки менее 0.1 с; она обладает высокими светоотражательными свойствами, химически стойкая.

II. Тонкий светозащитный колпачок из родия является имитатором абсолютно черного тела (АЧТ). Поэтому, используя полученную экспериментально тарировку световодного датчика без пленки по температуре модели АЧТ (рис. 3, кривая 2), можно применять такой чувствительный элемент и для измерения температуры внутри полупрозрачного высокотемпературного материала в процессе его разрушения.

III. С целью непрерывного измерения уноса материала была разработана оригинальная методика (Горностаев и др., 1980а), использующая два сквозных световода, один из которых прозрачный,

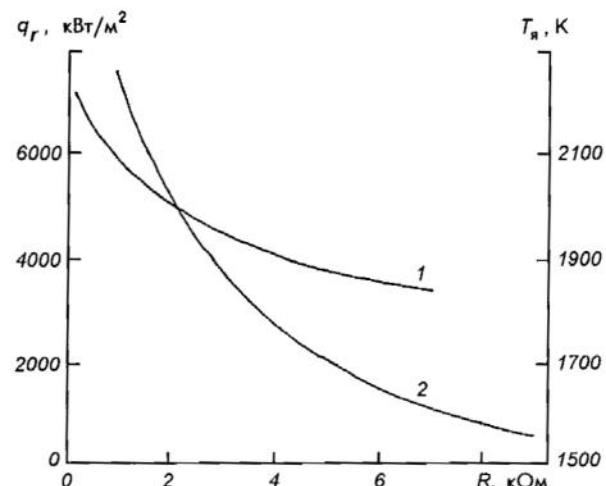


Рис. 3. Тарировочные зависимости световодных датчиков (диаметр световода 1 мм): 1 — по внешнему лучистому тепловому потоку q_r ; 2 — по яркостной температуре T_x абсолютно черного тела; R — фотосопротивление приемника излучения

а другой выполнен из цветного стекла и имеет существенную зависимость светопропускания от длины световода. В этом случае будет справедливым следующее соотношение для текущего значения длины цветного световода L_u , которая равна толщине уносимого материала:

$$L_u = A + K_u^{-1} \ln(J_u / J_n). \quad (1)$$

Здесь K_u — коэффициент поглощения материала цветного световода; J_u , J_n — световые потоки на выходе цветного и прозрачного световода; A — условная величина. В связи с тем, что оплавленный торец световода II (рис. 2) теряет апертуру, это соотношение было получено без учета боковых лучей. Для реализации данной методики существенными являются три аспекта: подбор и расчет оптоэлектронной пары цветной световод — фотоприемник; подбор компенсирующего фильтра для прозрачного световода; подбор пары «цветной световод — исследуемый материал» по температуре разрушения. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что с изменением цветовой температуры источника и интенсивности освещения сохраняется практически одна и та же «постоянная длины» цветного световода по пропусканию и постоянное соотношение между освещенностью в цветном канале определенной длины и в прозрачном световодном канале. Это позволяет использовать соотношение (1) инвариантно к условиям внешней освещенности (рис. 4).

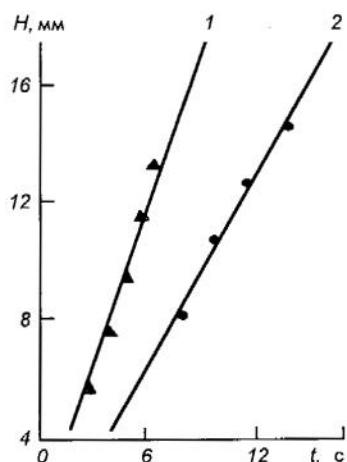


Рис. 4. Результаты измерения уноса H фторопласта-4 непрерывным датчиком (линия — датчик, треугольники — киносъемка, точки — линейный замер): 1 — конвективный тепловой поток $q = 1.6 \cdot 10^4$ кВт/м², давление торможения $P_e = 5.5 \cdot 10^5$ Па, температура торможения $T_e = 5500$ К; 2 — $q = 1.2 \cdot 10^4$ кВт/м², $P_e = 2.4 \cdot 10^5$ Па, $T_e = 2700$ К

IV. Выделение лучистой составляющей теплового потока при исследовании ТЗМ и оценка их поглощательной способности (Горностаев, Король, 1983).

При примерном равенстве температуры плавления T_n сквозного световода II (рис. 2) и температуры уносимой поверхности материала T_w на торце световода образуется тонкая пленка расплава стекла b вследствие высокого градиента температуры в поверхностном слое ТЗМ и сильной зависимости вязкости расплава кварцевого стекла от температуры. При этом происходит уменьшение светопропускания сквозного световода за счет изменения его апертуры и рассеивания света в пленке расплава.

Экспериментальным путем установлены следующие свойства пленки расплава на торце кварцевого световода:

- пленка состоит из трех стекол, соответствующих материалу «жилы», оболочки и продукту их взаимодействия;
- показатель преломления промежуточный между показателями преломления оболочки и «жилы» световода;
- следов образования кристобаллитной фазы на торце световода не обнаружено;
- в пленке исчезает четкая граница «жилы» и оболочки, есть газовые пузыри;
- толщина пленки составляет менее 0.1 мм.

Специальными экспериментами установлено, что светопропускание сквозного кварцевого световода,

который разрушается вместе с теплозащитным покрытием, составляет $\tau_{oc} = 10^{-2}\tau$, где τ — светопропускание «холодного» световода.

Тарировка датчика радиационного теплового потока (рис. 3, кривая 1), включающего оплавляемый световод II (рис. 2) диаметром 1 мм и CdSe-фоторезистор, проводилась на установке лучистого нагрева «Уран» с использованием водяного калориметра с зачерненной поверхностью. Флюктуации сигнала за счет изменения формы торца не превышали 3 %. Фотоприемник термостабилизировался с помощью блока, заполненного $\text{LiNO}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$. Погрешность обуславливается в основном точностью задания плотности лучистого теплового потока q , в фокальном пятне диаметром 1 мм (диаметр световода) и составляет примерно 8–10 %.

Световой поток J_{II} на выходе сквозного световода II можно представить в виде

$$J_{II} = J_w \tau_{oc} + B,$$

где J_w — световой поток на разрушающую поверхность материала, B — собственное тепловое (фоновое) излучение световода, которое определялось экспериментальным путем (и может нивелироваться с помощью ИК-светофильтра).

Установка за световодом II оптической системы с диспергирующим элементом позволит проводить спектральный анализ излучения продуктов разрушения материала, находящихся в газовой фазе (Дверняков, 1981).

С помощью датчиков, включающих световоды I и II было проведено исследование относительного изменения $K^*(t)$ поглощательной способности слоя сублимирующего материала ТТПС-15 при радиационном и конвективном нагреве (рис. 5). В данном случае погрешность измерения определяется в основном точностью оценки отношения световых потоков на выходе световодов по энергетической характеристике фотоприемника (10 %).

Установлено, что вследствие коксования нагреваемой поверхности материала происходит резкое увеличение его поглощательной способности — снижается интенсивность радиационного теплообмена внутри защитного покрытия.

V. В том случае, когда температура плавления сквозного световода значительно выше температуры поверхности материала T_w (световод III , рис. 2), он может использоваться для зондирования поля излучения газовой фазы вблизи поверхности. Например, эффект «выдвижения» кварцевого световода в газовую фазу получен при уносе сублимирующего материала (ТТПС-15) в струе жидкостного реактивного двигателя. Известно, что угол входа σ

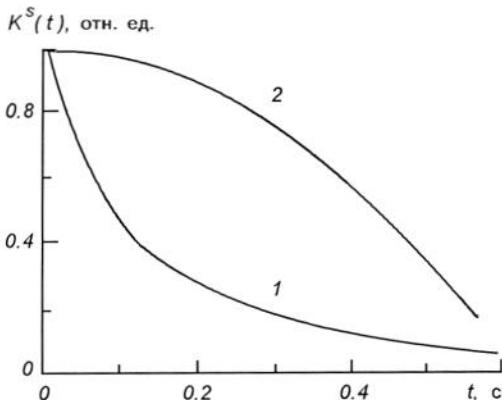


Рис. 5. Относительное изменение $K^s(t)$ поглощательной способности слоя материала ТТПС-15 толщиной 10 мм: 1 — воздушно-плазменный нагрев (конвективный тепловой поток $q = 0.3 \cdot 10^4 \text{ кВт/м}^2$, давление торможения $P_e = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, температура торможения $T_e = 6000 \text{ К}$); 2 — лучистый нагрев (лучистый тепловой поток $q_r = 0.9 \cdot 10^4 \text{ кВт/м}^2$)

меридиональных лучей зависит от показателя преломления n внешней среды

$$\sin\sigma = \frac{(n_{\infty}^2 - n_0^2)^{1/2}}{n}.$$

Здесь n_{∞} , n_0 — показатель преломления «жилы» и оболочки световода. Следовательно, для двух сквозных световодов, имеющих различные коэффициенты светопропускания $\tau_1(n)$ и $\tau_2(n)$, можно построить схему измерения показателя преломления n , используя отношение световых потоков J_1 и J_2 на выходе этих световодов (Горностаев, 1979):

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{\tau_1(n)}{\tau_2(n)} = f(n).$$

При этом функция $f(n)$ будет инвариантной к внешней освещенности. Для изготовления световодов можно использовать широкий класс высокотемпературных оптических материалов (лейкосапфир, HfO_2 , Sc_2O_3 , Y_2O_3 и др.). Момент потери апертуры световода, соответствующий началу его оплавления, можно зафиксировать по резкому уменьшению величины измеряемого светового потока J_1 и J_2 .

На основе принципов, изложенных в разделах I—IV, в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины была разработана серия волоконно-оптических датчиков и технологий изготовления головных частей изделий, препарированных световодами. Разработки выполнялись по заказам ведущих предприятий космиче-

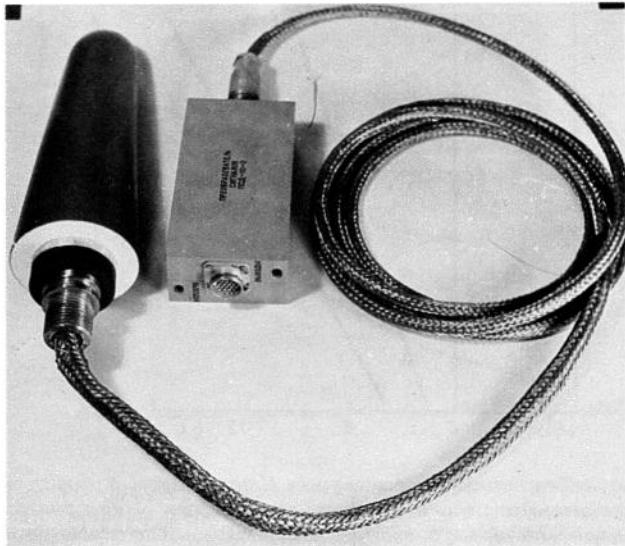


Рис. 6. Наконечник, оснащенный волоконно-оптическими датчиками, и 10-канальный преобразователь сигналов

ской отрасли (НПО им. С. А. Лавочкина, ЦКБМ, КБ «Южное», Свердловский машзавод, Московский институт теплотехники). В результате были созданы:

- непрерывные и дискретные датчики уноса (ДУ) сублимирующего ТЗМ (для спускаемого аппарата «Марс»);
- дискретные датчики уноса и технология изготовления серийных головных частей из трехмерного стеклопластика объемного плетения «Куб», оснащенных ДУ;
- дискретные датчики уноса и технология изготовления серийных наконечников из ниасита, оснащенных ДУ (рис. 6, 7);
- технология изготовления слоистого стеклопластика, препарированного ДУ; проведены исследования эффективности использования ДУ в материалах для сопловых блоков;
- датчики для выделения лучистой составляющей теплового потока при исследовании ТЗМ и оценки их поглощательной способности.

Датчики и технологии прошли отработку на стендах предприятий ЦНИИМАШ, НИИТП, Воткинском машзаводе, ИПМ НАН Украины. По сравнению с другими типами датчиков (термопарными, резистивными, радиоактивными и т. д.) волоконно-оптические датчики обладают большой информативностью, высокой точностью измерения уноса ТЗМ (0.5 мм), отсутствует влияние датчиков на разрушение теплозащитного покрытия.

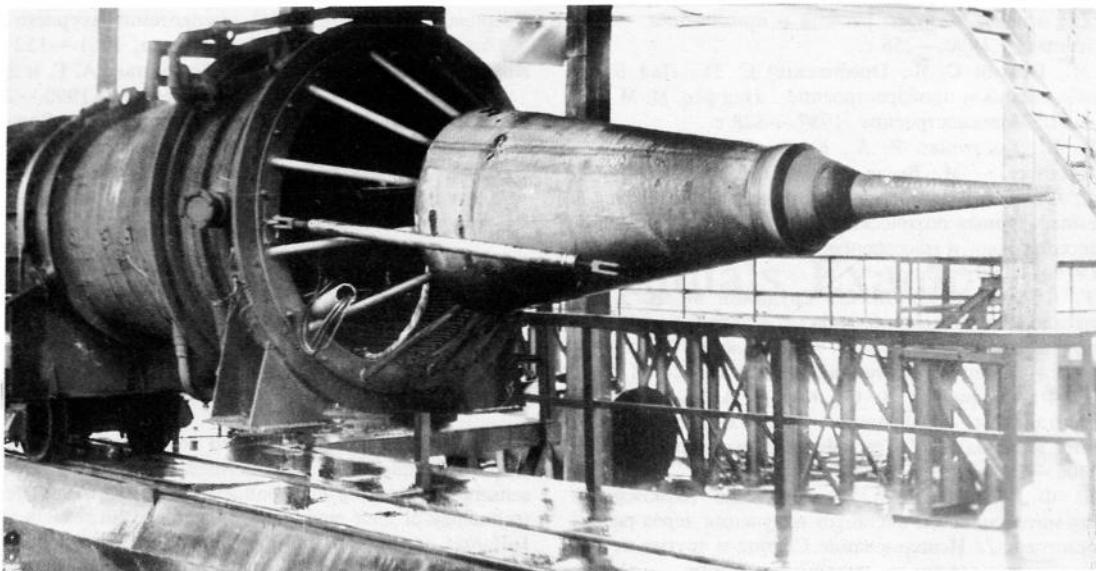


Рис. 7. Стендовая модель изделия для испытаний наконечников

Учитывая широкие возможности волоконно-оптических датчиков для измерения физических величин, можно предложить следующие направления развития указанных работ в рамках существующих проектов космической программы Украины.

1. Создание систем контроля эксплуатационных параметров (лучистый тепловой поток, показатель преломления излучающей среды) и характеристик (температура, унос, светопоглощение) работы тепло- и светозащитных покрытий КА, («Марс», «Регата», системы противодействия воздушно-космическим средствам нападения).

2. Разработка бортовых средств оптического контроля разделения частей транспортно-космических систем воздушного базирования («Ориль», «Свityзь»).

3. Разработка бортовых измерителей потоков нейтронов, рентгеновского и γ -излучения, заряженных релятивистских частиц на основе специальных волоконно-оптических чувствительных элементов.

Световолокно, легированное ароматическими соединениями, является сцинтилятором, что позволяет определять характеристики ионизирующего излучения (интенсивность, энергию и др.). Регистрация потока заряженных релятивистских частиц основана на возбуждении в волоконном световоде излучения Черенкова — Вавилова («Спектр», «Фо-

тон», «Марс»).

4. Разработка бортовых устройств для исследования магнитосферы и применения в системах управления АКА на основе волоконно-оптических магниточувствительных элементов, использующих эффекты Фарадея, Коттона—Мутона: в диапазоне 3—500 Э линейность составляет 1 % («Марс», «Спектр»).

Области использования световодных датчиков в космической отрасли далеко не исчерпаны. Особенно это относится к передаче сигналов неоптической природы на основе нелинейных физических свойств волоконных световодов. В этом случае внутри волокон взаимодействуют между собой и с материалом волокон несколько различных физических полей, а результат этих взаимодействий в виде неоптического сигнала передается по волоконному световоду (Марков и др., 1987). В большинстве случаев разработанные для космической отрасли волоконно-оптические датчики, после их соответствующей модификации, находят применение в разных областях народного хозяйства.

С использованием модификаций датчиков для исследования теплозащиты, были разработаны экспериментальные образцы устройств для автоматического контроля уровня расплава в установках электрошлакового литья; степени искрения щеточно-контактного аппарата турбогенератора.

- Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. — М.: Энергоатомиздат, 1990.—256 с.
- Бутусов М. М., Галкин С. Я., Оробинский С. П., Пал Б. П. Волоконная оптика и приборостроение / Под ред. М. М. Бутусова. — Л.: Машиностроение, 1987.—328 с.
- Верещагин И. К., Косяченко Я. А., Кокин С. М. Введение в оптоэлектронику. — М.: Высп. школа, 1991.—191 с.
- Горностаев Г. Ф. О возможности использования световодов в высокотемпературных оптических измерениях // Особенности процессов тепло- и массопереноса. — Минск: ИТМО АН БССР, 1979.—С. 21—23.
- Горностаев Г. Ф., Дверняков В. С., Грудинин М. И. и др. Теоретическое и экспериментальное исследование кинетики разрушения высокотемпературных материалов // Тепломассообмен VI. — Киев: Наук. думка, 1980а.—С. 124—131.
- Горностаев Г. Ф., Дверняков В. С., Король А. А. и др. Об экспериментальном определении продвижения границы разрушения материала // Теплофизика высоких температур.—1980б.—18, № 3.—С. 653.
- Горностаев Г. Ф., Король А. А. Исследование возможности измерения интенсивности внешнего излучения через разрушающий световод // Использование Солнца и других источников лучистой энергии в материаловедении. — Киев: Наук. думка, 1983.—С. 18—24.
- Дверняков В. С. Кинетика высокотемпературного разрушения материалов. — Киев: Наук. думка, 1961.—152 с.
- Красюк Б. А., Семенов О. Г., Шереметьев А. Г. и др. Световодные датчики. — М.: Машиностроение, 1990.—256 с.
- Марков П. И., Кеткович А. А., Саттаров Д. К. Волоконно-оптическая интроскопия. — Л.: Машиностроение, 1987.—286 с.
- Окоси Т., Окамато К., Оцу М. и др. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. — Л.: Энергоатомиздат, 1990.—256 с.
-
- FIBER-OPTICS SENSORS AND PROSPECTS FOR THEIR APPLICATION IN THE SPACE PROGRAMME OF UKRAINE
- G. F. Gornostaev*
- The principles of construction and advantages of fiber-optics sensors of physical quantities are described. The results of construction of sensors for studying low-conductivity materials and development of technology of their manufacture together with sensors are presented. Different applications of fiber-optics sensors are proposed for the present-day projects in the space programme of Ukraine.