

## ТЕРМООПТИЧЕСКИЙ ЗОНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОТОКОВ

Никитин П.В., Низовитин А.А., Степаненко С.А.

Подробная информация об авторах размещена на сайте

«Учёные России» - <http://www.famous-scientists.ru>

**В статье рассматривается термооптический зонд для измерения статической температуры.**

**Принцип устройства термозонда заключается в том, что горячий спай термозонда выполнен в виде полой сферической или цилиндрической микромодели черного тела, на входе в который установлен волоконнооптический световод, переносящий излучение микромодели к фотоприемнику. Зонд установлен внутри проточного насадка, что обеспечивает продольное обтекание термооптического элемента до- или сверхзвуковым подогретым потоком.**

**Суммарная погрешность измерения, включая погрешности за счет теплообмена и скоростную погрешность для термопарного зонда из хромельалюмеля, составляет  $\pm 1,5-2\%$ , а при использовании комбинированного термооптического  $\pm 1,2-1,5\%$ .**

Известно, что измерение температуры газовых потоков высокой скорости осуществляют с помощью термозондов – приемников температуры с термопарой, на основе которой определяют температуру газа [2,4]. Однако такие средства не обеспечивают необходимой точности измерений вследствие потерь энергии на теплоотвод по электродам термопары и за счет излучения. Поэтому целью измерения температуры газа и определение значений погрешности был разработан термооптический зонд, отличающийся от волоконнооптического термометра [3,6] тем, что он совмещен с термопарой и по существу является комбинированным термозондом с термоэлектрическим и термооптическим приемниками.

Горячий спай термопары выполнен в виде полой сферической или цилиндрической микромодели черного тела, диаметром до 50 мкм, внутри которой установлен оптически прозрачный торец высокотемпературного волоконнооптического световода, диаметром до 5 мкм. Противоположный торец световода подключен к фотоприемнику излучения.

По измеренным значениям величин э.д.с. термопары термоприемника излучения, при известном его  $\varepsilon_{\lambda T}$ , определяют действительную температуру термоприемника, а так же разницу между яркостной и действительной температурами.

Преимущество термооптического зонда по сравнению со штатными термопарными приемниками [2,4] заключается в возможностях определения погрешностей измерения температуры, связанных с теплоотводом по электродам термопары и введении поправки на температуру. Экспериментально получают два значения температуры термоприемника – при теплоотводе и без теплоотвода по электродам. Разность между значениями измеренных температур дает возможность оценить величину поправки на температуру.

Принцип работы термооптического базируется на использовании законов конвективного теплообмена и излучения. Например, сферическая поверхность микрозонда при внешнем обтекании потоком, нагревается по закону конвективного теплообмена Ньютона.

$$q_0 = \alpha(T_f - T_w) \quad (1)$$

В свою очередь, интеграл от интенсивности излучения плотности термочув-

ствительного элемента термооптического зонда в диапазоне длин волн  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$

представляет плотность интегрального полусферического излучения или суммарную

$$E_{\text{П}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_m} J_{\lambda} d\lambda = C_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_m} \lambda^{-5} \left( \exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1} d\lambda \quad (2)$$

При измерении цветовой температуры термооптического зонда погрешность измерений меньше, чем в случае измерения яркостной и радиационной температуры примерно в 1,5-2 раза, соответственно.

Отношение монохроматических степеней черноты при разных длинах волн в меньшей степени зависит от состояния поверхности внутри реального физическо-

$$\frac{1}{T_{\text{П}}} = \frac{1}{T_{\text{Я(П)}}} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon_{\lambda T}. \quad (3)$$

Согласно закону Вина, цветовая температура термодатчика  $T_{\text{Ц(П)}}$  связана с его истинной температурой  $T_{\text{П}}$ , соотношением [1]:

$$\frac{1}{T_{\text{П}}} - \frac{1}{T_{\text{Я(П)}}} = \frac{\ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}}{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_2 T} - \frac{1}{\lambda_1 T} \right)}. \quad (4)$$

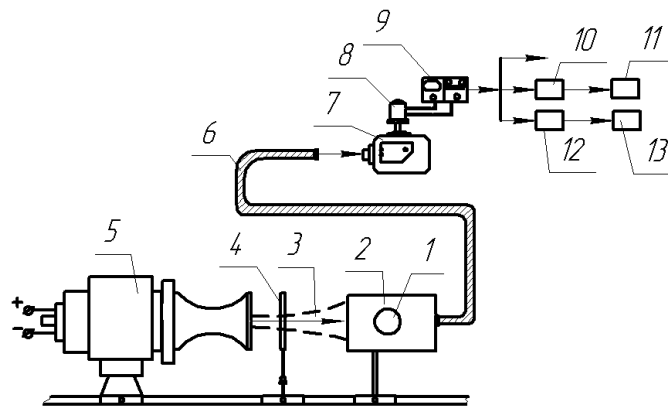


Рис. 1. Схема измерения статической температуры потока термооптическим зондом

Термооптический зонд, показанный на рисунке, включает следующие элементы: 1 - термочувствительный элемент, 2 - проточный насадок, 3 - высокотемпературный поток, 4 - шторка, 5 - электроннагреватель газа, 6 - волоконнооптический световод, 7 - монохромометр, 8 - ФЭУ - фотоэлектронный ускоритель, 9 - АЦП - аналого-цифровой преобразователь, 10 - ЭВМ, 11 - принтер, 12 - светолучевой осциллограф, 13 - измерительный и регистрирующий прибор.

мощность излучения:

го тела, то есть внутри горячего спая термомпары, выполненного в форме полый цилиндрической или сферической микромодели черного тела.

Согласно закону Вина связь между яркостной и действительной температурами тела или термочувствительного элемента термодатчика имеет вид

Такая конструкция термозонда с проточным насадком- экраном и продольным обтеканием термочувствительного элемента позволяет измерять до- и сверхзвуковые газовые потоки как с низким, так и с высоким уровнем статической температуры двумя методами и оценить погрешности измерений.

Известно, что температура торможения определяется с помощью термозондов экспериментально-расчетным методом по следующей формуле

$$T_0 = T_{ТП} + \frac{v^2}{2C_p} \quad (5)$$

где  $v$  – скорость газового потока в термодатчике,  $r$  – коэффициент восстановления температуры термодатчика – определяются экспериментально-расчетным путем,  $C_p$  – теплоемкость газа, значение

которой берется по таблицам при температуре газа  $T \approx T_{ТП}$ .

Используя в измерениях термооптический зонд и яркостный метод оптической пирометрии ТЧЭ зонда, температуру торможения можно оценить по следующей формуле:

$$T_0 = \frac{1}{\frac{1}{T_{Я(ТП)}} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda T}}} + \frac{v^2}{2C_p} \quad (6)$$

или

$$T_0 = \frac{T_{Я(ТП)}}{1 - T_{Я(ТП)} \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda T}}} + \frac{v^2}{2C_p}$$

С помощью термооптического зонда и метода оптической пирометрии, по цветовой температуре термочувствительного

элемента термодатчика можно оценить температуру торможения потока используя выражение

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_{Ц(ТП)}} - \frac{1}{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \ln \frac{\epsilon_{\lambda_2 T}}{\epsilon_{\lambda_1 T}}} + \frac{v^2}{2C_p} \quad (7)$$

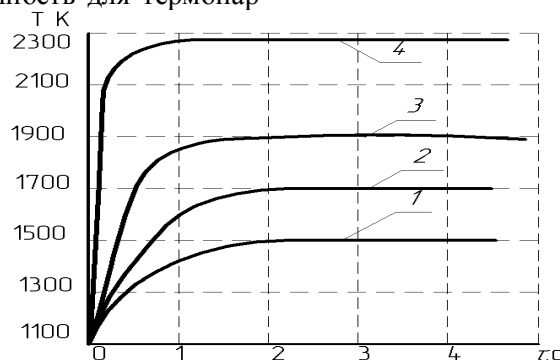
при известных значениях  $\epsilon_{\lambda T}$ ,  $v$  и  $C_p$ , которые должны быть определены заранее экспериментально-расчетным путем.

По данным экспериментов и путем расчетов сравнительная оценка погрешностей измерений температуры газового потока термодатчиком и термооптическим зондами показала, что при температуре 1400К, суммарная погрешность измерения, включая погрешности за счет теплообмена и скоростную погрешность для термодат-

ного зонда из хромельалюмеля, составляет  $\pm 1,5-2\%$ , а при использовании комбинированного термооптического  $\pm 1,2-1,5\%$ .

Результаты измерений статической температуры потока с использованием термооптического зонда представлены на рисунке 2.

Графики 1, 2, 3, 4 на рисунке 2 представляют мощность затраченную на нагрев газового потока.



**Рис. 2.** Результат измерений температуры торможения потока с использованием термооптического зонда

Принятые обозначения:  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - длины волн излучения,  $J_\lambda$  - интенсивность излучения,  $E_{ТП}$  - суммарная мощность излучения,  $C_1$  и  $C_2$  - первая и вторая постоянные Планка,  $\varepsilon_{\lambda_1}$  и  $\varepsilon_{\lambda_2}$  - монохроматические степени черноты внутренней поверхности горячего спая термочувствительного элемента,  $T_{ТП}$  - температура термоприемника,  $T_{Ц(ТП)}$  - цветовая температура термоприемника,  $v$  - скорость газового потока,  $r$  - коэффициент восстановления,  $T_0$  - температура торможения,  $C_p$  - теплоемкость газа при постоянном давлении и температуре  $T_{ТП}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Городов А.Н. //Основы пирометрии. М., Металлургия, 1971.
2. Гортышев Ю.Ф., Дресвянников Ф.Н., Идиатулин Н.С. и др. под ред. Щукина В.К.//Теория и техника теплофизического эксперимента. Энергоатомиздат, 1985.
3. Давыдов Н.Н., Никитин П.В. //Волоконнооптические термоприемники. Сб. тезисов докладов на Гагаринских чтениях. М., 1986.
4. Пегунин А.Н. //Методы и техника измерения параметров газового потока. М., Машиностроение, 1972.
5. Салов Г.В., Тихомиров Ю.Ф., Яковлев Л.Г. //Погрешности контрольно-измерительных устройств. Киев, "Техника", 1975.
6. Dils A.R. High-temperature optical fiber thermometer. J Appl. Phys, 1983, 54№3, p. 1198-1201.

### THERMAL OPTICAL PROBE FOR MEASUREMENT OF TEMPERATURE OF HETEROGENEOUS STREAMS

Nikitin P.V., Nizovitin A.A., Stepanenko S.A.

In the article it is considered thermal optical probe for measurement of static temperature.

The principle of the probe construction consists that hot junction of this thermal probe is made as cavital spherical or cylindrical micro model of a black body, on the entrance in which the optical fiber optical light guide carrying thermal radiation of micro model to a photo detector is established.

The probe is established inside flowing nozzle that provides a longitudinal flow of thermal optical element with subsonic or supersonic heated stream.

The total error of measurement, including errors due to heat exchange and a high-speed error for chromel-alumel thermocouple probe, makes  $\pm 1,5 - 2\%$ , and at use combined thermal optical probe  $\pm 1,2 - 1,5\%$ .

