

И.Г. Джеренов

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОАНОМЕТРА СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Институт электронных и информационных систем НовГУ, ingirik@rambler.ru

A heat-loss anemometer on the basis of carbide of silicon is presented, its heated area and temperature sensor being conductively connected. The model of calculation of the thermal fields of heat-loss anemometer is proposed. Distribution of thermal fields on a surface of heat-loss anemometer is constructed.

Ключевые слова: термоанемометр, расчет тепловых полей, карбид кремния

Введение

В последнее время необходимость экологического мониторинга окружающей среды, а также реализация различных промышленных программ по ресурсосбережению придали актуальность высокотемпературной расходомерии газов и жидкостей [1]. Кроме того, традиционно существующие проблемы точного, надежного и постоянного контроля скорости нагретых газовых потоков в турбинах, горелках, соплах постоянно требуют совершенствования метрологической базы.

Особое место занимают термоанемометрические зондовые методы, стационарные технические средства непрерывного контроля газовых потоков в диапазоне температур $T = 400 \dots 600^\circ\text{C}$, которые обеспечивают возможность дистанционного измерения малых и средних скоростей. Однако в условиях высоких температур и агрессивной среды резко сокращается срок службы измерительного зонда, изготовленного из традиционных материалов, в активной зоне, что приводит к получению недостоверных результатов и быстрой деградации чувствительного элемента, а это вынуждает разработчиков усложнять конструкцию и вводить дополнительные элементы [2].

Как показали исследования, реальную перспективу представляет использование карбида кремния для изготовления первичных преобразователей измерителей скорости. Обладая необходимыми электро- и теплофизическими параметрами, карбид кремния в рамках существующей полупроводниковой технологии позволяет реализовать термоанемометрические структуры, надежно действующие в условиях температур до 1000°C [3].

В то же время постоянное развитие техники и разнообразие условий эксплуатации термоанемометров приводит к появлению термоанемометрических преобразователей (ТП) сложной специфической формы и имеющих сложные кондуктивные связи. Для оптимизации конструкции и технологии изготовления, изучения функциональных характеристик ТП приходится проводить натурные эксперименты. Но техника высокотемпературных исследований требует серьезных затрат. Поэтому необходимым этапом исследования является моделирование характеристик ТП в широком диапазоне температур и скоростей потока. Результаты такого моделирования и приведены в настоящей работе.

Конструкция и принцип работы термоанемометрического преобразователя

Термоанемометрический преобразователь изготавливался на основе пластинчатых монокристаллов карбида кремния политаипа 6Н, полученных методом Лели. Профиль П-образного типа создавался электроэрозионной (либо лазерной) резкой с последующими стандартными технологическими операциями. Кристаллодержатель выполнялся из особо твердой латуни, он же играл роль контактов.

Термоанемометр позволяет измерять скорость потока газа с изменяющейся температурой по известному принципу [2], когда отвод тепла набегающим потоком от нагретой поверхности терморезистора изменяет его температуру, а следовательно, и сопротивление. Таким образом, если стабилизировать ток через терморезистор, то падение напряжения будет пропорционально изменению скорости потока.

Как видно из рис.1, зонд содержит два температурных элемента. Элемент 1 измеряет температуру нагревателя и вырабатывает первый сигнал. Элемент 2 измеряет температуру потока и вырабатывает второй сигнал.

Первый и второй сигналы поступают в схему управления нагревателем, которая регулирует количество отдаваемого им тепла таким образом, чтобы разность температур потока и нагревателя оставалась неизменной, входят в схему определения скорости, которая формирует третий сигнал, пропорциональный скорости потока.

Особенностью конструкции ТП является наличие кондуктивной связи между нагревателем и датчиком температуры, а также сужение элементов 1 и 2. Эти ве-

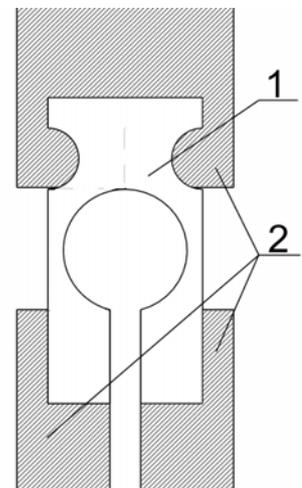


Рис.1. Конструкция термоанемометрического зонда. 1 — терморезистор, 2 — токовые дорожки — каркас

личины существенным образом влияют на чувствительность датчика температуры, значения рабочего греющего тока, а также на геометрические размеры ТП в целом, которые должны быть минимально возможными для уменьшения его коэффициента тепловой инерции.

Тепловая модель и результаты моделирования

На рис.2а приведена тепловая изотропная модель ТП, где заштрихованная область является нагреваемой зоной.

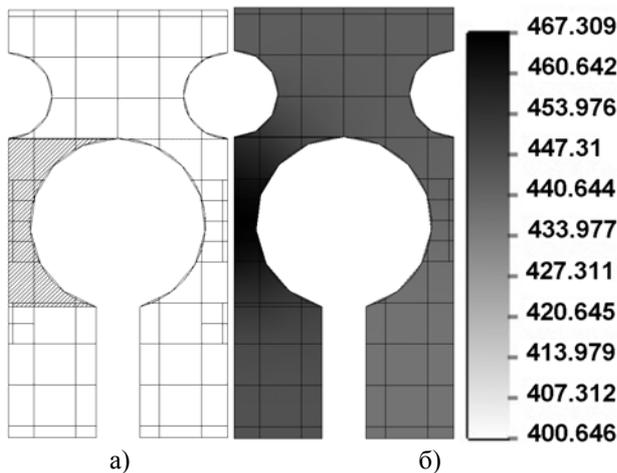


Рис.2. Результаты моделирования теплового режима ТП. а) тепловая модель, б) температурное поле ТП ($\Delta T = 70^\circ\text{C}$, $V = 5 \text{ м/с}$)

Запишем исходные уравнения Навье — Стокса [4]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \text{div} m \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right], \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \text{div} m \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right], \\ \rho \frac{D\omega}{Dt} &= Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{2}{3} \text{div} m \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь u , v , ω — составляющие поля скоростей в системе координат x , y , z ; ρ — плотность; t — постоянная времени.

К этим уравнениям следует присоединить еще уравнение неразрывности, которое в раскрытой форме имеет для течений сжимаемой жидкости следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

и уравнение состояния, связывающее между собой давление, плотность и температуру. Для идеального газа уравнение состояния имеет вид

$$p - \rho RT = 0, \quad (3)$$

где R — газовая постоянная; p — давление; T — абсолютная температура.

Наряду с моделированием с помощью уравнений (1)-(3) диффузии тепла в текучей среде моделируется также теплопередача в твердых телах с помощью уравнения

$$\frac{\partial \rho \cdot e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H, \quad (4)$$

где $e = c \cdot T$ (c — удельная теплоемкость, T — температура); λ — теплопроводность; Q_H — удельное (в единице объема) тепловыделение источника тепла.

Конвективный теплообмен между поверхностью твердых тел и текучей средой моделируется при моделировании пограничного слоя потока текучей среды.

Излучающие тепло поверхности задаются абсолютно черными, абсолютно белыми или идеально серыми, так что в соответствии с законом Ламберта их излучение предполагается диффузным, т. е. с не зависящей от направления излучения яркостью. В результате в соответствии с законом Стефана — Больцмана излучаемое с единицы поверхности тепло определяется как

$$Q_H = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T_w^4,$$

где ε — степень черноты поверхности; σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана; T_w — температура поверхности. Соответственно моделируется поглощение и/или отражение радиационного тепла участвующими в радиационном теплообмене поверхностями [5].

Эти уравнения решались методом конечных объемов.

Геометрическая модель разбивалась на кубические элементы (рис.2а). Зависимость коэффициента теплопроводности карбида кремния от температуры аппроксимировалась функцией $\lambda(T_T) = (5 \cdot 10^{-6}) \cdot T_T^2 - 0,00481 \cdot T_T + 1,3625$, где T_T — температура материала.

Была выполнена серия расчетов температурного поля ТП, типичный пример которых представлен на рис.2б. Достаточно хорошо видно, что температурное поле носит неоднородный характер, и величина теплового потока, затекающего во второй элемент, в большей степени зависит от величины кондуктивной связи между нагревателем и измерителем температуры. В процессе исследования не удалось подобрать значения геометрических размеров ТП (без изменения его общего контура) и постоянного греющего тока, чтобы полностью предотвратить затекание теплового потока в измеритель температуры, однако удалось свести его к минимуму.

Таким образом, решение данной задачи не может быть достигнуто только путем изменения геометрических размеров кондуктивной связи и величины греющего тока. Требуется введение дополнительных конструктивных элементов и подбор импульсных режимов подогрева, а это требует дополнительных исследований.

1. Горелик Д.О., Конопелько Л.А. Мониторинг атмосферы и источников выбросов. Аэроаналитические измерения. М.: Изд-во стандартов, 1992. 432 с.

2. Карачинов В.А., Туркин А.В. // Вестник НовГУ. Сер.: Ест-тест. и техн. науки. 1997. №5. С.6-8.
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1989. С.396-402.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. / Пер. с нем., М.: Наука, 1974. С.70-72.
5. Алямовский А.А. и др. Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. С.170-184.