

УДК 531.7;532.529

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЙ СМЕСЕЙ ГАЗОВ

© 2011 г.

В.Н. Зиновьев, А.Ю. Пак, И.В. Казанин

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

zinoviev@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Рассматривается возможность применения термоанемометрического метода для измерения средних и пульсационных параметров в течениях смесей газов. Приводятся характеристики разработанных в ИТПМ СО РАН датчиков концентрации для измерений в слоях смешения при высоких, в том числе и сверхзвуковых, скоростях потока. Получены эмпирические соотношения для закона теплообмена при различных концентрациях воздушно-гелиевой смеси в зависимости от чисел Маха и Рейнольдса, определены динамические характеристики датчиков концентрации в целом, а также и их отдельных элементов. Приводятся примеры применения датчиков концентрации для определения средней концентрации в бинарных смесях газов как при постоянном объеме, так и постоянном давлении системы.

Ключевые слова: термоанемометрический метод, концентрация, бинарная смесь газов.

Характеристики нестационарных потоков смесей газов и жидкостей являются объектами пристального изучения во многих областях науки. Известно, что процессы в таких течениях зависят как от средних характеристик потока, так и от пульсаций, включая и пульсации концентрации компонентов. При этом для практических приложений важным является не только общий уровень пульсаций, но и их спектральный состав, а также распределение по модам. Однако, несмотря на большой интерес к этим проблемам, основная часть исследований посвящена изучению средних характеристик потоков. Экспериментальные исследования пульсационных процессов и их влияния на средние параметры течения, сопротивление трения и теплообмен между телом и потоком в течениях смешения газов с существенно различающимися физическими и термодинамическими свойствами до сих пор фактически не проводились и ограничивались измерениями распределения средних параметров, включая и распределение концентрации.

Общепризнано, что термоанемометр является наиболее подходящим инструментом для измерения пульсаций в потоках газов. При исследовании смешения потоков одного и того же газа применение термоанемометра возможно для определения как средних, так и пульсационных характеристик. Однако при смешении газов с существенно различающимися термодинамическими характеристиками, например, для

смесей типа воздух–гелий или воздух–водород, применение известных методов измерения пульсаций ограничено, поскольку наличие легких газов может оказывать значительное влияние на чувствительность датчика термоанемометра. Поэтому для измерений в таких газовых смесях для этих целей следует применять датчики специальных конструкций.

Возможность применения датчиков, использующих термоанемометрический принцип измерения не только для измерения средней концентрации компонентов газовой смеси, но и для исследования пульсаций концентрации, является целью данной работы.

Суть термоанемометрического метода заключается в использовании известного физического эффекта изменения электрического сопротивления нагретого чувствительного элемента, помещенного в движущуюся среду. При этом величина конвективных тепловых потерь зависит не только от изменения основных параметров потока, описывающих течение: скорости, плотности ρ и температуры торможения T_0 , но и от параметров среды.

В общем виде уравнение, связывающее электрическую энергию, подводимую к датчику термоанемометра, и тепловую энергию, отводимую от датчика, можно записать:

$$ei = \pi l \lambda (T_w - T_e) Nu, \quad (1)$$

где e , i – напряжение на датчике и электрический ток, l – характерный размер датчика, λ – коэффициент теплопроводности газа, T_w – темпе-

ратура нагретой нити, T_e – температура холодной нити, Nu – число Нуссельта.

Согласно [1], число Нуссельта выражается через число Рейнольдса соотношением:

$$Nu = (A + B\sqrt{Re})(1 - ka_w), \quad (2)$$

где A , B и k – константы, получаемые из калибровочных экспериментов; коэффициент перегрева определяется как

$$a_w = \frac{R_w - R_e}{R_e}, \quad (3)$$

где R_w и R_e – сопротивление нагретого и холодного датчика соответственно.

С учетом изложенного уравнение (1) можно переписать в виде

$$ei = \pi l \lambda (T_w - T_e)(A + B\sqrt{Re})(1 - ka_w), \quad (4)$$

Проведя логарифмическое дифференцирование уравнения (4), можно записать уравнение, связывающее отклонения электрического напряжения Δe с отклонениями массового расхода Δm и температуры торможения ΔT_0 . Подробный вывод и анализ этого соотношения приводится в [1]. Для термоанемометра постоянного тока это равенство имеет вид

$$\frac{\Delta e}{e} = F_{CTA} \frac{\Delta m}{m} - G_{CTA} \frac{\Delta T_0}{T_0}, \quad (5)$$

где F_{CTA} и G_{CTA} – коэффициенты чувствительности к массовому расходу и температуре торможения соответственно:

$$F_{CTA} = \frac{B\sqrt{Re}}{4(A + B\sqrt{Re})}, \quad (6)$$

$$G_{CTA} = \frac{\alpha_* R_* \eta T_0 [1 - ka_w (a_w + 2)]}{R_e 2a_w (1 - ka_w)} - \frac{\omega}{2} (1 - 2F_{CTA}). \quad (7)$$

Различные концентрации компонентов газовой смеси будут оказывать влияние на термодинамические свойства газа, а значит, как видно из выражений (6), (7), и на коэффициенты чувствительности датчика термоанемометра. От концентрации будут зависеть такие па-

раметры газа, входящие в выражения (6), (7), как μ – коэффициент динамической вязкости, R – универсальная газовая постоянная, ρ – плотность газа. Рассмотрим зависимости параметров газа от концентрации для бинарных смесей:

$$\mu_{12} = \frac{\mu_1}{1 + G_{12}c_2/c_1} + \frac{\mu_2}{1 + G_{21}c_1/c_2}, \quad (8)$$

$$G_{ik} = \frac{\left(1 + \sqrt{\frac{\mu_i}{\mu_k} \left(\frac{M_k}{M_i}\right)^{1/4}}\right)^2}{2^{3/2} \left(1 + \left(\frac{M_i}{M_k}\right)\right)^{1/2}}, \quad (9)$$

где μ_{12} – коэффициент динамической вязкости смеси газов; μ_i – коэффициент вязкости i -го компонента смеси;

$$R = \frac{M_1 c_1}{M_1 c_1 + M_2 c_2} (C_{P1} - C_{V1}) + \frac{M_2 c_2}{M_1 c_1 + M_2 c_2} (C_{P2} - C_{V2}); \quad (10)$$

где C_P , C_V – теплоемкости газа при постоянном давлении и температуре соответственно.

С использованием зависимостей (1)–(10) были получены эмпирические соотношения для закона теплообмена при различных концентрациях воздушно-гелиевой смеси в зависимости от чисел Маха и Рейнольдса, выполнены расчеты коэффициентов чувствительности термоанемометра к массовому расходу F , температуре торможения G и относительного коэффициента чувствительности $r = F/G$ в зависимости от концентрации для смеси воздух–водород.

В настоящем исследовании принимал участие В.А. Лебига.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант №10-08-9200-ННС_а) и междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 143.

Список литературы

1. Лебига В.А., Зиновьев В.Н., Пак А.Ю. Термоанемометрия сжимаемых течений // Аэромеханика и газовая динамика. 2003. №4. С. 53–70.

USING THE HOT WIRE TECHNIQUE FOR MEASURING THE CHARACTERISTICS OF GAS MIXTURE FLOWS

V.N. Zinovyev, A.Yu. Pak, I.V. Kazanin

The applicability of hot-wire technique for measuring the average and fluctuating currents in gas mixtures is considered. The characteristics of concentration probe developed in the ITAM SB RAS for measurements in the mixing layers at high subsonic and supersonic velocities are summarized. The empirical relations for the law of heat transfer at different concentrations of air-helium mixture as a function of Mach and Reynolds are obtained and the dynamic characteristics of concentration probe as a whole, as well as their individual components are defined. Examples of using a concentration probe to determine the average concentration in binary mixtures of gases, such as constant volume and constant pressure system, are shown.

Keywords: hot-wire technique, concentration, binary mixtures of gases.