УДК 536.244

ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ

© 2023 ***Пометун Е.Д.***

Рассмотрен термоанемометрический метод измерения скорости газового потока. Описаны особенности применения термоанемометра в турбулентном потоке. Приведена погрешность, возникающая при измерении пульсаций скорости газового потока.

Ключевые слова: термоанемометр, скорость газового потока, пульсации.

Введение. Термоанемометрический метод относится к косвенным методам измерения скорости газовых потоков. Он основан на зависимости теплоотдачи чувствительного элемента – датчика от скорости течения газа, его температуры и состава. Охлаждение датчика потоком газа приводит к изменению его температуры и, соответственно, электрического сопротивления (тепловыделения Джоуля). Измеряя падение напряжения на датчике и ток в его цепи, можно при известных физических свойствах материала чувствительного элемента и закономерностях теплообмена определить локальные значения газодинамических параметров.

Расшифровка показаний термоанемометров, т. е. вычисление скорости и других параметров по данным о теплоотдаче, сопряжена со значительными трудностями из-за зависимости теплоотдачи датчика от большого числа факторов различной природы. В общем случае теплоотдача от датчика термоанемометра определяется:

- естественной конвекцией;
- вынужденной конвекцией;
- излучением;
- теплоотводом от нити к державке.

При вынужденной конвекции интенсивность теплоотдачи от нагретой нити термоанемометра к обтекаемому нить потоку зависит от скорости этого потока. Именно эта зависимость и лежит в основе термоанемометрического метода измерения скорости потока среды. Что касается остальных процессов, влияющих на теплоотвод, то они практически не зависят от скорости течения и являются источниками погрешностей, поэтому следует путем соответствующего подбора геометрических и режимных параметров сводить их влияние к минимуму.

Основная часть. Основная часть. Интерес для термоанемометрии представляют данные по зависимости суммарного коэффициента теплоотдачи от скорости потока и физических свойств газа этого потока [1]. Разность температуры длинного цилиндра, обтекаемого потоком воздуха с температурой, можно представить в виде:

$$\Delta T = T_w - T_\infty \le 200K\,, \tag{1}$$

где T_w – температура поверхности;

T_∞ – температура невозмущенного потока.

Зависимость (1) может быть аппроксимирована выражением:

$$\mathrm{Nu} = C\,\mathrm{Re}^n\,, \tag{2}$$

где $\mathrm{Nu} = \alpha d / \lambda_g$ – число Нуссельта;

$\mathrm{Re} = \rho_g u d / \mu_g$ – число Рейнольдса; $C = C\,(\mathrm{Re})$;

$n = n(\mathrm{Re})$: α – коэффициент теплоотдачи;

λ_g, μ_g – соответственно коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости (индекс g отвечает параметрам газа);

u – скорость течения;

d – диаметр цилиндра.

Численные значения коэффициентов из выражения (2) приведены в таблице 1, из которой видно, что в области изменения 1 < $\mathrm{Re} < 4 \cdot 10^5$ величины C и n изменяются в пределах 0,03 < C < 0,9 и 0,33 < n < 0,8. В работе предложена степенная зависимость с постоянными коэффициентами, аппроксимирующая опытные данные при 1< $\mathrm{Re} < 4 \cdot 10^3$ с погрешностью, не превышающей 4 %:

$$\mathrm{Nu} = 0,43 + 0,48\,\mathrm{Re}^{0,5}. \qquad (3)$$

В формулах (2), (3) теплофизические коэффициенты, входящие в критерии Nu, Re и характеризующие свойства газа, определяются по средней температуре (4):

$$T_m = (T_w + T_\infty) / 2, \qquad (4)$$

где T_w – температура нити;

T_∞ – температура невозмущенного потока.

Таблица 1. Диапазоны измерения

Диапазон изменения Re	Значения констант		
	C	*n*	C_1
1 – 4	0,8910	0,330	0,872
$4 \div 4 \cdot 10^1$	0,8280	0,385	0,802
$4 \cdot 10^1 \div 4 \cdot 10^3$	0,6150	0,461	0,600
$4 \cdot 10^3 \div 4 \cdot 10^4$	0,1740	0,618	—
$4 \cdot 10^4 \div 4 \cdot 10^5$	0,0279	0,805	—

В таблице 2 приведены коэффициенты значения коэффициентов *A*, *B* и *n*.

Таблица 2. Значения коэффициентов *A*, *B* и *n*

Коэффициенты	Область изменения Re	
	0,02 < Re < 44	44 < Re < 140
n	0,45	0,51
A	0,24	0,00
B	0,56	0,48

При уменьшении диапазона изменения числа Рейнольдса можно аппроксимировать опытные данные с высокой точностью. В характерной для термоанемометрии области изменения числа Re < 150 для воздуха получено следующее соотношение, обеспечивающее, по-видимому, наибольшую точность:

$$\mathrm{Nu} = (A + B\,\mathrm{Re}^n)\left(\frac{T_m}{T_\infty}\right)^{0,17}. \qquad (5)$$

Для очень малых чисел Re зависимость $\mathrm{Nu}(\mathrm{Re})$ имеет следующий вид:

$$\mathrm{Nu} = (1{,}18 - 1{,}10\lg \mathrm{Re})\left(\frac{T_m}{T_\infty}\right)^{0,17}. \qquad (6)$$

В области изменения 0,02 < Re < 0,5 расхождение в результатах расчета по формулам (5) и (6) не превышает 2%. Эти результаты лучше согласуются с опытными данными при Re < 0,2 [1].

Из соотношения (6), в ограниченном диапазоне скоростей, зависимость между электрическим напряжением на нити E_{TA} и числом Рейнольдса в изотермическом потоке может быть представлена в виде (7):

$$E_{TA} = \sqrt{C \cdot \left(A + B \cdot \sqrt{\mathrm{Re}}\right)}, \qquad (7)$$

где *C, A, B* – константы, определяемые при градуировке ТА, Re – число Рейнольдса.

В случае использования в качестве чувствительного элемента малогабаритных термисторов, покрытых защитной (стеклянной) оболочкой, необходимо учитывать градиент температуры, возникающий в защитном слое. В работе [2] предложено уравнение, учитывающее теплопроводность стеклянной оболочки. Однако геометрические параметры чувствительного элемента, такие как толщина и форма оболочки, являются индивидуальными для каждого термистора, в результате чего необходимо выполнять градуировку для каждого термистора, использующегося в схеме термометра [3-4]. В случае использования термистора в схеме ТА ПТ сопротивление R_w и температура перегрева ЧЭ T_w постоянны, следовательно, их величина определяется при фиксированном значении (в одной точке градуировочной кривой).

Как показали исследования [5], зависимость между скоростью и выходным напряжением ТА при числе Рейнольдса $\mathrm{Re} < 1500$ может быть аппроксимирована различными функциями, причем, предпочтительным является использование полиномиальной регрессии вида [6]:

$$V = \frac{1}{\rho} \cdot \sum_{i=0}^{4} a_i \cdot E_{TA}^i, \qquad (8)$$

где a_i – коэффициенты полинома, ρ – плотность воздуха.

При постоянной температуре и атмосферном давлении связь между выходным напряжением и скоростью потока определяется в виде [8]:

$$E_{TA} = \sum_{i=0}^{4} b_i \cdot V^{-i}, \qquad (9)$$

где b_i – коэффициенты полинома, V – скорость потока.

В случае если в потоке присутствуют гармонические колебания скорости относительно среднего значения скорости V_0, то мгновенное значение скорости будет равно:

$$V = V_0 \cdot (1 + k \cdot \sin(\omega t)),$$

где k – относительная амплитуда колебаний.

Среднее значение электрического напряжения $E(k)$ на выходе ТА постоянной температуры с учетом соотношений (8) и (9) равно:

$$E(k) \sim \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\sum_{i=0}^{4} b_i \cdot (V_0 \cdot (1 + k \cdot \sin(\omega t)))^{-i} \right) \cdot dt. \quad (10)$$

Изменяя параметр k в соотношении (10) в диапазоне от 0 до 0,5, получаем величину напряжения E_0 (при $k = 0$) и ряд значений $E(k)$, соответствующих следующим интенсивностям турбулентности: 1%, 10%, 20%, 40%, 50% (рис. 1). По соотношению (9), рассчитываем величину скорости для каждого значения E_{TA}. На рисунке 1 приведена оценка относительной погрешности как функции интенсивности турбулентности при гармоническом законе изменения пульсаций скорости в потоке.

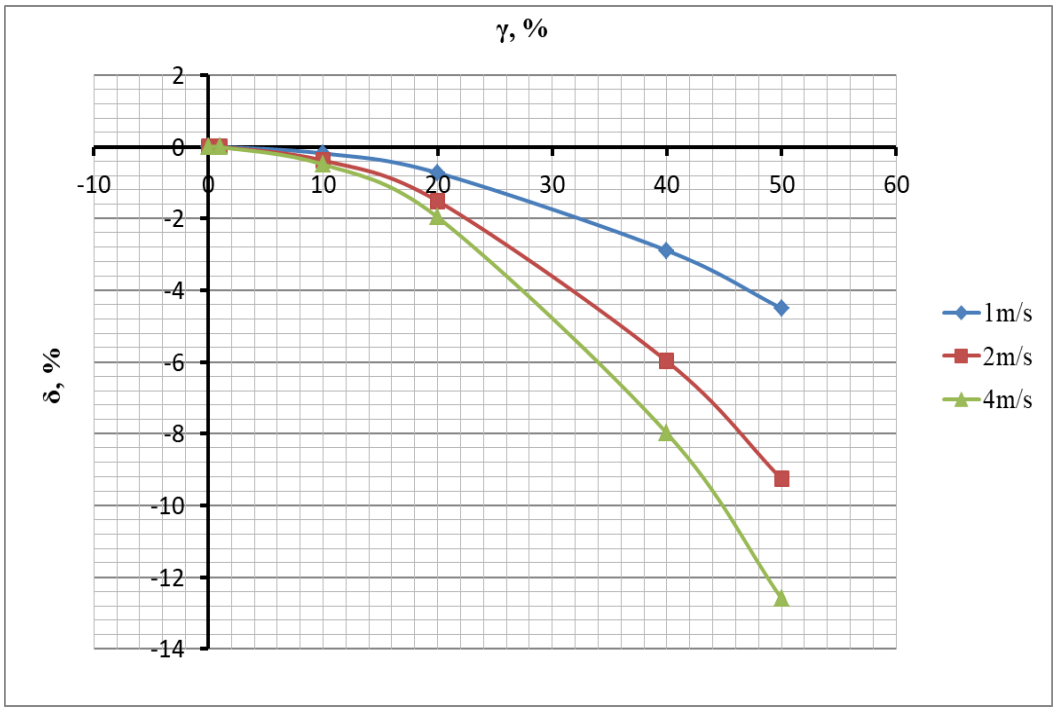

Рис. 1. Величина погрешности, возникающая при интегрировании выходных данных ТА

Физический смысл возникновения данной погрешности состоит в том, что при осреднении выходного электрического сигнала ТАП среднее значение скорости смещается пропорционально величине пульсаций турбулентности и нелинейности градуировочной характеристики. Причем, при малых скоростях, примерно, до 1 м/с, величина относительной погрешности не превышает 5% при 50% интенсивности турбулентности (рис. 1). При скорости 4 м/с величина погрешности увеличивается и

составляет около 12%. Полученные данные хорошо коррелируют с результатами, приведенными в работе [8].

Выводы. Для исключения погрешности первого типа не рекомендуется в информационно–измерительной системе использовать алгоритм обработки, содержащий фильтр, расположенный перед преобразованием выходного сигнала ТА в скорость потока. В общем случае, для измерителей, имеющих нелинейную зависимость между выходным сигналом и измеряемым параметром, рекомендуется выполнять расчет мгновенных значений параметра, затем фильтрацию сигнала (в случае необходимости) и только потом – вычисление средних значений [7]. При измерениях, выполненных в работе, была выбрана именно такая схема, исключающая данную погрешность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Математическая модель нагретой термоанемометрической нити / А. А. Хвостов, А. А. Журавлев, Д. И. Целюк, Д. В. Сысоев // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2020. – № 2(20). – С. 115–118.
2. Украинский, Ю. Д. Аппроксимация степенной функцией теплоотдачи термистора в режиме датчика термоанемометра постоянной температуры / Ю. Д. Украинский // тез. докл. Мелекино, 2002. – С. 3-4.
3. Плотников, А. Д. Сравнительный анализ приборов и методов измерения скорости и направления ветра / А. Д. Плотников, Л. И. Сучкова // Ползуновский альманах. – 2010. – № 2. – С. 119-122.
4. Юшко, С. В. Особенности подготовки термоанемометра для измерения скорости турбулентного потока / С. В. Юшко // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 21. – С. 136–138.
5. Пометун, Е. Д. Исследование функций аппроксимации градуировочной характеристики термоанемометра в неизотермическом газовом потоке / Е. Д. Пометун, В. Н. Лебедев // Сборник научных трудов «Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе».– 2015. – №1(8) – 2(9). – С. 89–93.
6. Пометун, Е. Д. Обработка выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры в динамическом режиме работы / Е. Д. Пометун, И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 50–55.
7. Оценка погрешности измерения средней скорости с помощью термоанемометра в турбулентных газовых потоках / Е. Д. Пометун, Н. И. Болонов, В. В. Белоусов [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 6(208). – С. 133–144.

Поступила в редакцию 01.11.2023 г., рекомендована к печати 16.11.2023 г.

THERMOANEMOMETRIC METHOD FOR MEASURING PULSATIONS OF THE VELOCITY OF TURBULENT FLOWS

Pometun E.D.

A thermoanemometric method for measuring the velocity of a gas flow is considered. The features of using a thermoanemometer in a turbulent flow are described. The error that occurs when measuring pulsations of the gas flow velocity is given.

Keywords: thermoanemometer, gas flow velocity, pulsation.

Пометун Екатерина Дмитриевна
кандидат технических наук, доцент кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: e.pometun.fnpme@mail.ru

Pometun Ekaterina Dmitrievna
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.