

## Исследование функций аппроксимации градуировочной характеристики термоанемометра в неизотермическом газовом потоке

Пометун Е.Д., Лебедев В.Н.  
Донецкий национальный университет  
Alternativa19031992@rambler.ru

*Пометун Е.Д., Лебедев В.Н. «Исследование функций аппроксимации градуировочной характеристики термоанемометра в неизотермическом газовом потоке». Предложена методика пересчета выходного электрического сигнала термоанемометрического комплекса, состоящего из термометра и термоанемометра постоянной температуры, в мгновенные значения температуры и скорости неизотермического потока воздуха, в предположении, что сложная функция, описывающая теплообмен нагретого элемента, может быть представлена в виде произведения двух более простых функций, причем первая функция зависит от числа Рейнольдса, а вторая – от относительного перегрева чувствительного элемента термоанемометра. Проверка показала хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений скорости потока воздуха в диапазоне  $3 \div 20$  м/с.*

**Ключевые слова:** аппроксимирующие функции, термоанемометр постоянной температуры, погрешность, неизотермический поток.

### Введение

Термоанемометр постоянной температуры находит широкое применение, в основном, для измерения скорости воздушных потоков. Наряду с достоинствами этого метода измерений, такими как: сравнительная простота и дешевизна прибора, а так же малая область осреднения датчика, особенно при использовании микропровода или малогабаритных термисторов. Существенным недостатком термоанемометра является сильная зависимость выходного электрического сигнала от температуры. Известно, что универсального способа устранения температурной зависимости (термокомпенсации) не существует. В каждом конкретном случае выбирается оптимальный метод, основанный на различных технических решениях.

Метод термокомпенсации, разработанный авторами данной работы, предполагает использование микроконтроллера при обработке электрических сигналов в реальном времени, или стандартных математических программ при разделении во времени процесса измерения и обработки сигналов. Метод основан на гипотезе о возможности представления сложной функции, описывающей теплообмен нагретого датчика термоанемометра постоянной температуры, зависящей от двух параметров (скорости и температуры), в виде произведения двух более простых функций (скорости потока воздуха и его температуры).

Целью данной работы является исследование функций аппроксимации выходного сигнала термоанемометра в неизотермическом газовом потоке, поиск некоторых математических соотношений для

разделенных функций и экспериментальная проверка полученных результатов.

### Основная часть

На кафедре физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ДонНУ был разработан и изготовлен измерительный комплекс, состоящий из комбинированного датчика: термоанемометра постоянной температуры (ТА ПТ) и термометра. Комбинированный датчик состоит из двух идентичных малогабаритных термисторов СТЗ-18. Один из термисторов, расположенный впереди по потоку, является датчиком температуры, второй термистор находится на расстоянии около 2 мм за датчиком термометра и используется в качестве чувствительного элемента ТА ПТ.

Выходными электрическими сигналами является электрическое напряжение по двум каналам: температуры и скорости. Если в некоторых конкретных условиях изменяются только скорость и температура, тогда:

$$E_{TA} = f_1(V, T), \quad (1)$$

$$E_T = f_2(T), \quad (2)$$

где  $E_{TA}$  – напряжение ТА ПТ,  $E_T$  – напряжение термометра.

Определим вид функции  $E_T = f_2(T)$ . Зависимость между электрическим сопротивлением и температурой термистора имеет нелинейный характер и, в первом приближении, описывается экспоненциальной функцией с двумя постоянными коэффициентами  $\beta$  и  $R_0$ , индивидуальными для каждого термистора. В данной работе

использовался более точный способ, предложенный в [1]. Для каждого из термисторов была получена экспериментальная зависимость между электрическим сопротивлением и температурой термистора в диапазоне 18 – 100 °С. Причем в диапазоне 18 – 45 °С погрешность не превышала 0,2 °С. На основании этих результатов построена аппроксимирующая функция для вычисления температуры потока и определено сопротивление термистора ТА ПТ при температуре, равной 100 °С. Для расчета температуры потока использовалось следующее соотношение:

$$R_t = R_0 \cdot e^{\frac{(B_0 + B_1 \cdot \ln(Rt))T_0 - T}{T_0 T}}, \quad (3)$$

где  $R_t$  – текущее сопротивление при температуре  $T$ ,  $T_0$  – сопротивление термистора при температуре  $T_0 = 25$  °С,  $B_0$  – справочная константа,  $B_1$  – экспериментальная константа, определяемая в процессе градуировки.

Определим вид функции  $E_{TA} = f_1(V, T)$ . Теплоотдача длинного цилиндра (нити), обтекаемого потоком воздуха, описывается уравнением Кинга [2]:

$$Nu = 0,42 \cdot Pr^{0,2} + 0,5 \cdot Pr^{0,33} \cdot Re^{0,5}, \quad (4)$$

где  $Pr$  – число Прандтля,  $Re$  – число Рейнольдса.

Таким образом,  $Nu = f(Re, Pr)$ , но для большинства двухатомных газов число Прандтля слабо зависит от температуры и для воздуха в диапазоне 18...45 °С может быть принято равным  $Pr = 0,699...0,703$ , что позволяет при обработке экспериментальных данных полагать  $Nu = f(Re)$  [2].

Представим характеристическое число Нуссельта в виде [3]:

$$Nu = \frac{E_{TA}^2 d}{R_w \lambda_g S (T_w - T_g)}, \quad (5)$$

где  $T_g$  – температура газа,  $T_w$  – температура нити,  $d$  – диаметр нити,  $R_w$  – сопротивление нагретой нити,  $S$  – площадь поверхности,  $\lambda_g$  – теплопроводность газа.

В ограниченном диапазоне скоростей зависимость между теплообменом и числом Рейнольдса может быть представлена соотношением вида:

$$Nu = (A + B Re^n) \cdot \left(\frac{T_g}{T_w}\right)^{-m} \dots \quad (6)$$

или

$$\frac{E_{TA}^2 d}{R_w \lambda_g S (T_w - T_g)} \left(\frac{T_g}{T_w}\right)^m = A + B Re^n. \quad (7)$$

Правая часть уравнения  $A + B Re^n = f(V)$  есть функция только от числа Рейнольдса, а

выражение  $\frac{E_{TA}^2 d}{R_w \lambda_g S (T_w - T_g)} \left(\frac{T_g}{T_w}\right)^m = f(T_g)$  – зависимость от электрической мощности и температуры газа.

Практика показывает [4], что общий вид зависимости между теплообменом и числом Рейнольдса, заданной соотношением (6), сохраняется для разных типов термоанемометрических датчиков, в том числе, для термисторов.

Представим соотношение (7) в виде

$$E_{TA} = f(T_g) \cdot f(V). \quad (8)$$

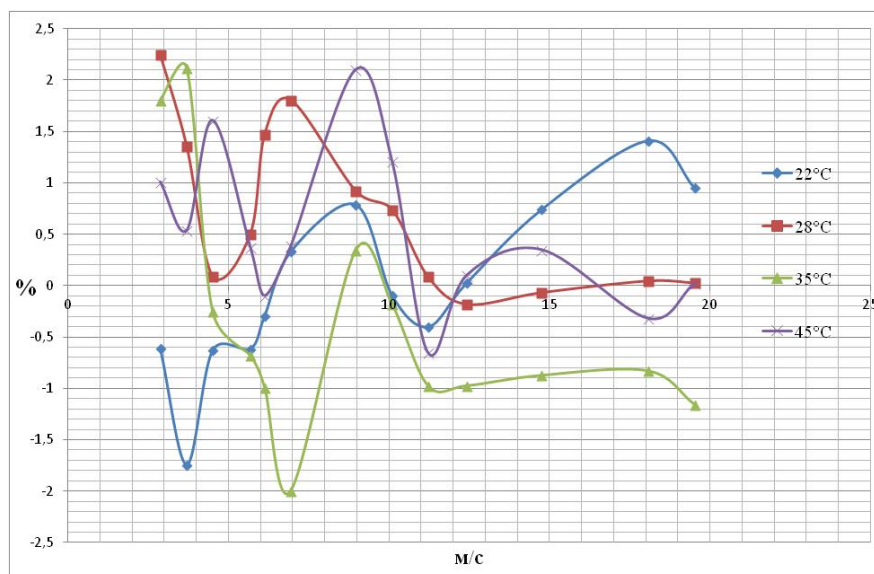
Было определено, что условию термокомпенсации удовлетворяет функция вида:

$$f(T_g) = C \cdot (T_w - T_g), \quad (9)$$

где  $C$  – экспериментальная константа.

Экспериментальные исследования выполнялись на установке АДС-200/250 [5], предоставленной ДонНУ ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Автоматическая система управления позволяет устанавливать стабилизированные значения следующих параметров: температуры – от комнатной до 60 °С и скорости потока воздуха – от 1,5 до 40 м/с. Были получены градуировочные характеристики термоанемометрического комплекса: в диапазоне температуры – от 18 °С до 45 °С и по скорости потока – от 3 до 20 м/с.

Для сравнения проверено два способа аппроксимации функции  $f(V)$ : с помощью уравнения Кинга (6) и полиномиальной функции. Вычисление коэффициентов в уравнении Кинга с учетом (7) свелось к вычислению коэффициентов  $n$  и  $A, B$ , при этом расчетная погрешность составила около 4%. Можно предположить, что аппроксимирующая функция в правой части уравнения (7), имеющая большее количество коэффициентов, обеспечит более высокую точность. Для решения этой задачи использовалась полиномиальная зависимость. Было определено, что оптимальная степень полинома  $N = 4$ . При дальнейшем увеличении степени полинома расчетная погрешность не уменьшалась. Результаты для  $N = 4$  представлены на рисунке 1. Максимальная погрешность составляет менее 2,5 % при минимальной скорости, равной 3 м/с.

Рисунок 1. – График погрешностей при аппроксимации полиномом  $N = 4$ 

Исследования показали, что при скорости менее 3 м/с гипотеза о разделении параметров не выполняется. Такое ограничение связано, возможно, с особенностями конструкции термистора СТЗ-18 и с техническими ограничениями используемого оборудования. В частности, уравнение Кинга в виде (3) не учитывает зависимость теплообмена от конвективных потоков, возникающих вокруг нагретого элемента и оказывающих существенный вклад в теплообмен при скоростях, сравнимых со скоростью тепловой конвекции. Вероятно, учет этого эффекта позволит расширить диапазон применимости гипотезы в область малых скоростей. Необходимо учитывать, что поверхностная температура покрытого стеклом термистора СТЗ-18 в уравнении (9) зависит от скорости потока.

### Выводы

1. Доказана принципиальная возможность представления выходного сигнала ТА ПТ в виде произведения двух более простых функций скорости и температуры.
2. Определено, что гипотеза о разделении параметров температуры и скорости выполняется в диапазоне 3 – 20 м/с.
3. По сравнению с уравнением Кинга использование полиномиальной зависимости для аппроксимации функции скорости позволяет уменьшить погрешность.
4. В данной серии экспериментов со степенью полинома  $n \geq 4$  погрешность перестает уменьшаться. Максимальная погрешность составляет 2,5 % при минимальной скорости, равной 3 м/с.

### Список литературы

1. Кузнецов Д.Н. Исследование некоторых функций аналитического описания экспериментальных градуировочных характеристик термисторов / Д.Н. Кузнецов, В.Н. Лебедев, Ю.Д. Украинский // Материалы восьмого международного научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». – 2007. – Т. 3. – С. 104.
2. Ярин Л.П. и др. Термоанемометрия газовых потоков / Л.П. Ярин, А.Л. Генкин, В.И. Кукес. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 198 с.
3. Ю.Д. Украинский. Аппроксимация степенной функцией теплоотдачи термистора в режиме датчика термоанемометра постоянной температуры / тез. докл. Мелекино, 2002. – 3 с.
4. Пометун Е.Д. Сравнение чувствительности термоанемометров двух типов: импульсного и постоянной температуры / Е.Д. Пометун, Д.Н. Кузнецов // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2013. – №1(4)–2(5). – С. 107.
5. Кузнецов Д.Н., Дьяченко А.А., Чупис Д.А. Настройка оптимального регулятора температуры воздушного потока аэродинамического стенда АДС – 200/250 // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Вычислительная техника и автоматизация. Выпуск 21 (183) – Донецк: ДонНТУ, 2011. С. 171 – 177.

### Referents (transliteration)

1. Kuznecov D.N. Issledovanie nekotoryh funkcij analiticheskogo opisanija jeksperimental'nyh graduirovocnyh karakteristik termistorov [A study of certain functions analytic description of the experimental calibration characteristics thermistor] / D.N. Kuznecov, V.N. Lebedev, J.D. Ukrainskij // Materialy vos'mogo mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminaru "Praktika i perspektivy razvitiya partnerstva v sfere vysshej shkoly". – 2007. – t. 3. – p. 104.
2. Jarin L.P. i dr. Termoanemometrija gazovyh potokov [Thermoanemometer of gas flows] / L.P. Jarin, A.L. Genkin, V.I. Kukes. – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1983, – 198 p.
3. J.D. Ukrainskij. Approksimacija stepennoj funkciej teplootdachi termistora v rezhime datchika termoanemometra postojannoju temperatury [Approximation of exponential function in the heat of the thermistor sensor mode, a constant temperature anemometre] / tez. dokl. Melekino, 2002. – 3 p.
4. Pometun E.D. Svravnenie chuvstvitel'nosti termoanemometrov dvuh tipov: impul'snogo i postojannoju temperatury [Comparison of the sensitivity thermoanemometers two types: pulse and a constant temperature] / E.D. Pometun, D.N. Kuznecov // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve. – 2013. – no.1(4)–2(5). – p. 107.
5. Kuznecov D.N., D'jachenko A.A., Chupis D.A. Nastrojka optimal'nogo reguljatora temperatury vozdušnogo potoka ajerodinamicheskogo stenda ADS – 200/250 [Setting the Optimal airflow regulator aerodynamic stand ADS temperature – 200/250] // Nauchnye trudy Doneckogo nacional'nogo tehničeskogo universiteta. Serija: Vychislitel'naja tehnika i avtomatizacija. Issue – 21 (183) – Doneck: DonNTU, 2011, pp. 171 – 177.

**Пометун К.Д., Лебедев В.М. «Дослідження функцій апроксимації градувальної характеристики термоанемометра в неізотермічному газовому потоці».** Запропоновано методику перерахунку вихідного електричного сигналу термоанемометричного комплексу, який включає в себе термометр та термоанемометр постійної температури, в миттєві значення температури і швидкості неізотермічного потоку повітря, в припущенні, що складна функція, яка описувала теплообмін нагрітого елемента, може бути представлена у вигляді добутку двох простіших функцій, причому перша функція залежить від числа Рейнольдса, а друга – від відносного перегріву чутливого елемента термоанемометра. Перевірка показала гарний збіг експериментальних і розрахункових значень швидкості потоку повітря в діапазоні  $3 \div 20$  м / с.

**Ключові слова:** апроксимаційні функції, термоанемометр постійної температури, похибка, неізотермічний потік.

**Pometun E., Lebedev V. "Investigation of the approximation functions of calibration characteristics thermoanemometer in non-isothermal gas flow".** The method of conversion the output electrical signal at the thermoanemometer's complex in an instant temperature and non-isothermal air flow rate is proposed. Hot-wire complex is consists of a thermometer and a constant temperature anemometer. It is assumed that a complex function describing the heated heat transfer element can be represented as the product of two simpler functions, the first function dependent on the Reynolds number, and the second – on the relative heat sensitive element anemometer. The audit is showed good agreement of experimental and calculated values of air flow rate in the range of  $3 \div 20$  m / s. The method of temperature compensation, developed by the authors, is requires the use of a microcontroller in processing electrical signals in real time, or standard mathematical software, the separation in time of the measurement process and signal processing.

**Keywords:** approximation function, wire anemometers constant temperature, error, non-isothermal air flow.

Стаття поступила в редакцію 20.06.2015  
Рекомендована к публикации канд. техн. наук А.В. Звягинцевой