

УДК 681.121

**ТЕРМОКОМПЕНСАЦИЯ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА  
ТЕРМОАНЕМОМЕТРА НА ОСНОВАНИИ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛООВОГО  
БАЛАНСА****Лебедев Владимир Николаевич,**

старший преподаватель кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха,

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,

Донецкая Народная Республика, г. Донецк

**Пометун Екатерина Дмитриевна,**

старший преподаватель кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха,

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,

Донецкая Народная Республика, г. Донецк

E-mail: alternativa19031992@rambler.ru

**Васильева Анна Васильевна,**

ведущий инженер ГБУ «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ИННОВАЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ»,

Донецкая Народная Республика, г. Донецк

E-mail: vasilyeva.ann.v@gmail.com.

**Аннотация**

В статье приведен способ термокомпенсации выходного электрического сигнала термоанемометра постоянной температуры, основанный на разделении переменных в уравнении теплообмена нагретой нити, не требующий дополнительной градуировки по температуре. Представлены экспериментальные результаты, полученные в диапазоне скоростей от 0,3 до 15 м/с и температуры от 16 до 35 °С.

**Ключевые слова:** термоанемометр постоянной температуры, градуировка, термокомпенсация.

**THERMAL COMPENSATION OF THE OUTPUT SIGNAL OF THE HOT-WIRE  
ANEMOMETER ACCORDING TO THE THERMAL BALANCE EQUATION****Vladimir N. Lebedev,**

Senior Lecturer of the Department of Physics of Non-Equilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povha,

Donetsk National University,

Donetsk People's Republic, Donetsk

**Ekaterina D. Pometun,**

Lebedev Vladimir Nikolaevich,

Senior Lecturer of the Department of Physics of Non-Equilibrium Processes, Metrology and

Ecology named after I.L. povha,

Donetsk National University,

Donetsk People's Republic, Donetsk

E-mail: alternativa19031992@rambler.ru

**Anna V. Vasilyeva,**

Leading Engineer of the State Budgetary Institution "SCIENTIFIC AND TECHNICAL CENTER OF INNOVATIONS AND TECHNOLOGIES",

Donetsk People's Republic, Donetsk

E-mail: vasilyeva.ann.v@gmail.com

---

ABSTRACT

---

A method for thermal compensation of the CTA output voltage based on the heat transfer equation of a heated filament is considered, which does not require additional temperature calibration. The experimental results obtained in the range of speeds from 0.3 to 15 m/s and temperatures from 16 to 35 °C are presented.

---

**Keywords:** constant temperature hot-wire anemometer (CTA), calibration, thermal compensation.

---

**Введение.** Термоанемометры постоянной температуры (ТПТ), наряду с лазерными анемометрами являются одними из широко распространенных приборов для измерения среднего значения и пульсаций скорости газовых потоков. По сравнению с лазерными анемометрами, они имеют более простую конструкцию, не требуют введения в поток микрочастиц и слабо чувствительны к вибрациям.

Существенным недостатком ТПТ является сильная зависимость выходного электрического сигнала от температуры, давления, плотности и химического состава газового потока. В ряде случаев можно учитывать только влияние температуры, остальные параметры не оказывают на результат существенного влияния [1]. Для определения зависимости выходного сигнала от температуры и скорости выполняется градуировка по двум переменным: как правило, устанавливается температура и выполняется градуировка датчика во всем диапазоне скоростей, затем задается следующее значение температуры потока и градуировка повторяется. Данный способ апробирован и широко используется на практике, однако требует наличия специальных аэродинамических стенов, позволяющих одновременно стабилизировать температуру и скорость потока.

В данной статье рассмотрен способ обработки выходных данных ТПТ без его градуировки по температуре, основанный на использовании в качестве термокомпенсирующего множителя соотношения, полученного аналитическим путем для теплообмена нагретой нити, обтекаемой потоком газа. Значения коэффициентов этого соотношения могут быть вычислены на основании настроек, приведенных в технической документации на термоанемометр или по коэффициенту перегрева, заданного оператором, и температуре газового потока.

**Обоснование способа.** Обработка полученных при градуировке массивов данных может выполняться различными способами, приводящими выходной сигнал к виду, не зависящему от температуры (термокомпенсации). Рассмотрим способ термокомпенсации, описанный в работе [2].

Уравнение теплообмена нагретой нити (цилиндра) имеет вид [1]:

$$Nu = 0,42 \cdot Pr^{0,2} + 0,5 \cdot Pr^{0,33} \cdot Re^{0,5} \quad (1)$$

где  $Nu = \frac{\alpha_1 \cdot d}{\lambda}$  - число Нуссельта;  $\alpha_1$  - коэффициент конвективной теплоотдачи,  $d$  -

характерный размер,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$  - число Прандтля;  $\nu$  - кинематическая вязкость,  $\alpha$  - коэффициент температуропроводности;

$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$  - число Рейнольдса;  $V$  - скорость потока.

Для большинства двухатомных газов число Прандтля слабо зависит от температуры и для воздуха в диапазоне 18...45 °С изменяется в диапазоне  $Pr=0.699...0.703$  [2]. Представим число Нуссельта в виде [3]:

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

где  $E_{TA}$  - электрическое напряжение термоанемометра при текущей скорости потока,  $d$  - диаметр нити,  $R_w$  - сопротивление нагретой нити,  $\lambda_g$  - теплопроводность газа,  $S$  - площадь поверхности нити,  $T_w$  - температура нити,  $T_g$  - температура газа.

Зависимость теплообмена от числа Рейнольдса может быть представлена соотношением вида [2]:

$$\frac{E_{TA}^2 \cdot d}{R_w \cdot \lambda_g \cdot S \cdot (T_w - T_g)} \cdot \left(\frac{T_g}{T_m}\right)^{0,17} = A + B \cdot Re^n, \quad (3)$$

где  $T_m = \frac{T_w + T_g}{2}$  - поверхностная температура нити;  $A, B$  - константы.

Правая часть уравнения (3) не зависит от температуры. В левой части сгруппированы две переменные величины - напряжение на нити, температура газа и нагретой нити. Преобразуем левую часть уравнения (3) к виду:

$$\frac{d}{R_w \cdot \lambda_g \cdot S \cdot (T_w - T_g)} \cdot \left(\frac{T_g}{T_m}\right)^{0,17} = C_0 \cdot f(T), \quad (4)$$

где  $\frac{d}{\lambda_g \cdot S} = f(T)$  - константа.

Учитывая, что сопротивление нити не изменяется ( $R_w = const$ ), получим:

$$C_1 \cdot E_{TA}^2 \cdot f(T) \cong f(Re), \quad (5)$$

где  $C_1$  - константа.

Можно предполагать, что соотношение (5) не будет зависеть от температуры газового потока, что равносильно представлению зависимости (4) в форме произведения двух независимых функций: скорости и температуры [2].

Для ТПТ сопротивление чувствительного элемента постоянно, следовательно, электрическая мощность будет пропорциональна квадрату напряжения. После простых преобразований, получим:

$$E_{TAC}^2 = C_1 \cdot E_{TA}^2 \cdot f(T) = C_2 \cdot (1 + b\sqrt{Re}), \quad (6)$$

где  $E_{TAC}^2$  - термокомпенсированное значение выходного напряжения;  
 $C_2, b$  - константы.

Термокомпенсация выполняется в следующей последовательности:

1) выходное напряжение  $E_{TAC}$  оцифровывается;  
 2) с помощью программы работающей в режиме «real time», полученные данные возводятся в квадрат;

3) полученные значения умножаются на величину  $f(T)$ .

Функция  $f(T)$  зависит от: температуры чувствительного элемента -  $T_w$ , температуры газового потока -  $T_g$  и «поверхностной» температуры -  $T_m$ . Температура чувствительного элемента с большой точностью задается в процессе изготовления ТПТ или, в отдельных модификациях прибора, настраивается оператором путем установки коэффициента перегрева. Для чистых проводников температура и сопротивление связаны температурным коэффициентом сопротивления  $\rho$ . Коэффициент перегрева равный отношению электрического сопротивления нагретого проводника к холодному равен:

$$k = 1 + \rho \cdot (T_w - T_0) \quad \text{или} \quad T_w = \frac{1}{\rho} (k - 1) + T_0 = const, \quad (7)$$

где  $T_0$  - температура холодной нити.

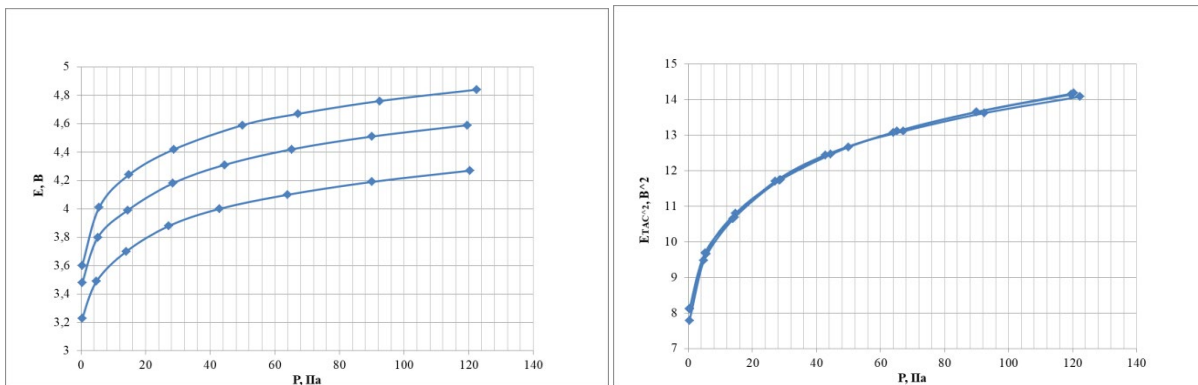
После подстановки в соотношение (4), величины поверхностной температуры  $T_m$  [3], получаем:

$$f(T) = \frac{1}{T_w - T_g} \cdot \left( \frac{2 \cdot T_g}{T_w + T_g} \right)^{0.17}. \quad (8)$$

Множитель  $f(T)$  является функцией одной переменной  $T_g$ . Для выполнения термокомпенсации достаточно получить температуру газа, подставить данное значение в соотношение (8) и умножить его на выходное напряжение ТПТ, возведенное в квадрат (6). Можно предполагать, что при корректно измеренных температурах необходимости в градуировке датчика ТПТ по температуре не возникает.

Необходимо учитывать, что характерное время изменения температуры газового потока должно быть значительно больше величины тепловой постоянной времени термоанемометрического преобразователя, причем в процессе работы необходимо постоянно измерять температуру газового потока и выполнять преобразования по соотношению (6). Рекомендуется использование специального алгоритма, компенсирующего погрешности, возникающие при значительных пульсациях скорости [5].

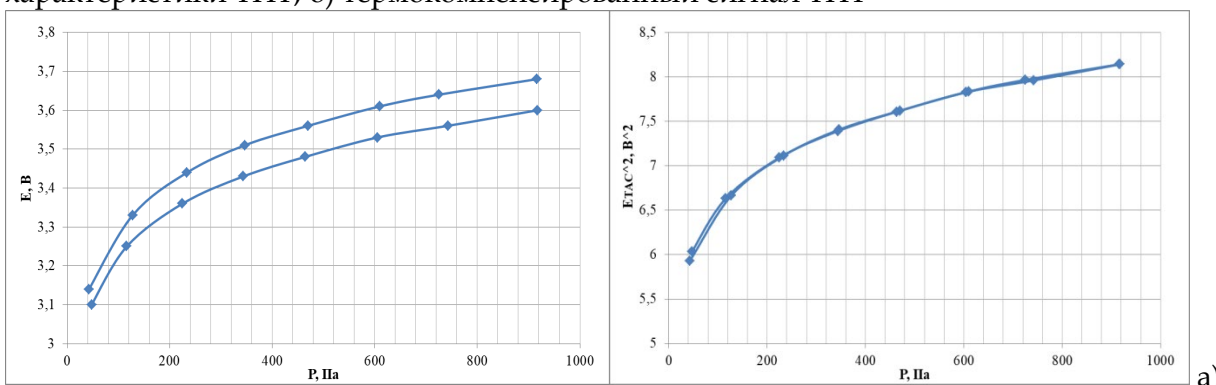
**Экспериментальные результаты.** Для экспериментальной проверки полученных соотношений была выполнена серия измерений с использованием стендов: Аэродинамический стенд 200/250 (АДС 200/250) и Специальная градуировочная установка-1 (СГУ -1) в диапазоне скоростей: от 0,3 м/с до 15 м/с и температуры: от 16 °С до 35 °С и в диапазоне скоростей 0,3 ÷ 2,0 м/с и температур 16 ÷ 21 °С [2 - 5]. Результаты измерений представлены на рисунках 1 и 2.



а)

б)

Рисунок 1. Данные полученные на стенде АДС200/250: а) исходные градуировочные характеристики ТПТ, б) термокомпенсированный сигнал ТПТ



б)

а)

Рисунок 2. Данные полученные на стенде СГУ-1: а) исходные градуировочные характеристики ТПТ, б) термокомпенсированный сигнал ТПТ

На рисунке 3 представлена зависимость скорости газового потока, измеренной с помощью ТПТ, от скорости, заданной на стенде (эталонной). В качестве функции линеаризации использовался полином 4-й степени [2, 4].

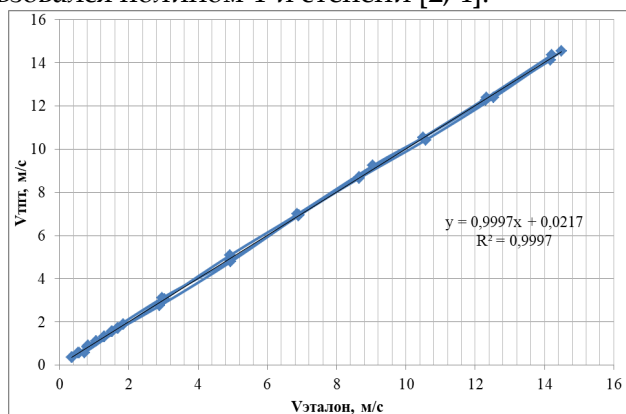


Рисунок 3. Линеаризованные напряжения ТПТ

Для повышения точности аппроксимации, весь диапазон был разбит на два участка, в соответствии с заданными диапазонами скоростей. Коэффициенты полиномов подбирались для каждого участка индивидуально.

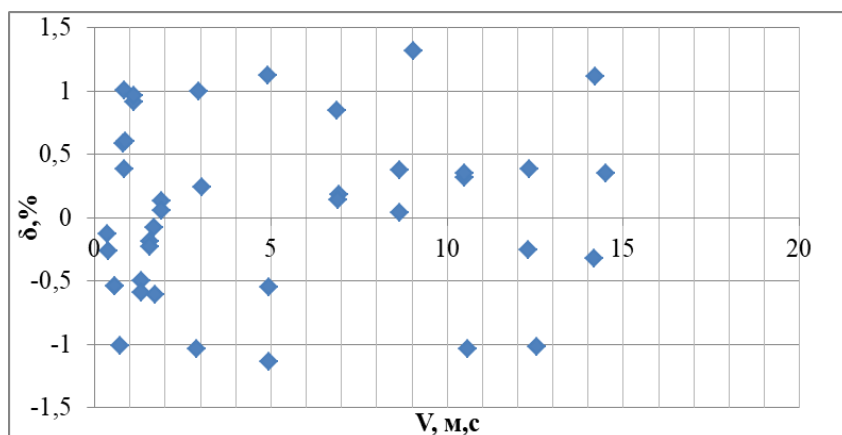


Рисунок 4. График относительной погрешности

На рисунке 4 представлен график относительной погрешности, полученная между эталонной скоростью, заданной на установках, и скоростью, рассчитанной по выходному напряжению термоанемометра. Полученные результаты доказывают, что достаточно выполнить градуировку термоанемометра только по скорости, а функцию термокомпенсации определить по температуре чувствительного элемента ТПТ, заданной при настройке по соотношению (6). При этом относительная погрешность не превышает 1,5% (рис. 4).

Для контроля правильности вычисленных параметров, рекомендуется выполнить одно измерение при средней скорости воздушного потока и температуре, значительно отличающейся от температуры, при которой выполнялась градуировка. В случае необходимости, температура  $T_w$  корректируется в пределах не более  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

Рассмотренный способ позволяет в несколько раз сократить время и затраты на градуировку ТПТ, не требует специализированных стендов, стабилизирующих одновременно скорость и температуру газового потока, и может быть рекомендован для термоанемометрических чувствительных элементов.

#### Список литературы:

1. Ярин Л.П. Термоанемометрия газовых потоков / Л.П. Ярин, А.Л. Генкин, В.И. Кукес. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ие, 1983. – 198с.
2. 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.
3. Украинский Ю.Д. Аппроксимация степенной функцией теплоотдачи термистора в режиме датчика термоанемометра постоянной температуры / Ю.Д. Украинский // тез. докл. Мелекино, 2002. – С. 3 – 4.
4. 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.
5. Пометун Е. Д. 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. № 6(208), 2019. – С. 133–144.

**References:**

1. Yarin L.P. Thermal anemometry of gas flows / L.P. Yarin, A.L. Genkin, V.I. Kukes. - L. : Mashinostroenie, Leningrad. Department, 1983. - 198 p.
2. Pometun E.D. Investigation of the functions of approximation of the calibration characteristic of a hot-wire anemometer in a non-isothermal gas flow / E.D. Pometun, V.N. Lebedev // Collection of scientific papers "System analysis and information technology in the sciences of nature and society", 2015. - No. 1 (8) - 2 (9). - pp. 89-93.
3. Ukrainian, Yu.D. Approximation by the power function of the thermistor heat transfer in the mode of a constant temperature hot-wire anemometer sensor / Yu.D. Ukrainian // Melekino, 2002. - pp. 3 - 4.
4. Pometun E. D. Processing the output signal of a constant temperature hot-wire anemometer in a dynamic mode of operation / E. D. Pometun, I. A. Tretyakov // Bulletin of the Donetsk National University. Series G: Technical sciences, 2021.- No. 2. - pp. 50-55.
5. Pometun E. D. Estimating the error in measuring the average velocity using a hot-wire anemometer in turbulent gas flows / E. D Pometun, N. I. Bolonov, V. V. Belousov [et al.] // Izvestiya YuFU. Technical science, 2019. -. No. 6(208).- pp. 133-144.