

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-992-998

УДК 53.083.6

О возможности расширения исследуемых динамических диапазонов в термоанемометрии

Вячеслав Петрович Ходунков✉

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

walkerearth@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9208-7462>

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты исследования возможности расширения динамических диапазонов термоанемометрических методов. Актуальность работы обусловлена востребованностью новых методов измерения теплогидродинамических параметров высокоскоростных газовых потоков для целей научного приборостроения. Новизна представляемого решения состоит в использовании двух термоанемометров с существенно различающейся тепловой инерцией для одновременного измерения скорости потока и коэффициента теплоотдачи. **Метод.** Предложенный метод основан на явлении инерционности отклика любой термодинамической системы при ступенчатом тепловом воздействии. Согласно методу в исследуемом потоке, размещают два одинаковых по форме и размерам тела, обладающие разной тепловой инерцией. На тела оказывают ступенчатое тепловое воздействие и выполняют регистрацию нестационарного температурного запаздывания тел друг относительно друга. Используя максимальное значение температурного запаздывания, расчетным путем находят значение коэффициента теплоотдачи тел с исследуемым потоком. Скорость потока определяют по величине момента времени, соответствующего максимальному температурному запаздыванию, при этом используют градуировочную характеристику, полученную предварительно на эталонном потоке. **Основные результаты.** Научно обоснован новый метод термоанемометрии, получено уравнение измерения метода, разработаны алгоритм измерений и обобщенная схема устройства, реализующего метод, дано значение ожидаемой неопределенности результатов измерений. Результаты моделирования показали, что относительная неопределенность, обеспечиваемая представленным методом, не превышает 1,5 %. **Практическая значимость.** Разработанный метод позволяет существенно повысить точность и расширить исследуемые динамические диапазоны искомых величин для широкой номенклатуры газовых потоков. Метод может найти применение в расходомерии газоздушных потоков.

Ключевые слова

термоанемометрия, газовый поток, тепловая инерция, скорость, коэффициент теплоотдачи, ступенчатое воздействие, перегрев, запаздывание, сигнал

Ссылка для цитирования: Ходунков В.П. О возможности расширения исследуемых динамических диапазонов в термоанемометрии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 992–998. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-992-998

On the possibility of expanding the studied dynamic ranges in thermal anemometry

Vyacheslav P. Khodunkov✉

D.I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

walkerearth@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9208-7462>

Abstract

The paper presents the results of a study of the possibility of expanding the dynamic ranges of hot-wire methods. The relevance of the work is due to the demand in new methods for measuring the thermal and hydrodynamic parameters

of high-speed gas flows for the purposes of scientific instrumentation. The novelty of the presented technical solution lies in the use of two hot-wires anemometers with significantly different thermal inertia for simultaneous measurement of the flow velocity and the heat transfer coefficient in it. The theoretical basis of the proposed method is based on the phenomenon of the inertia of the response of any thermodynamic system under a stepwise thermal effect on it. The method consists in placing in the investigated flow two bodies of the same shape and size which have significantly different thermal inertia. The bodies are subjected to a stepped thermal effect, and the non-stationary temperature delay of the bodies relative to each other is recorded. Using the maximum value of the temperature delay, the value of the heat transfer coefficient of the bodies with the investigated flow can be evaluated by calculation. The flow rate is found from the value of the moment of time corresponding to the maximum temperature delay while using the calibration characteristic previously obtained on the reference flow. The new thermal anemometry method is scientifically substantiated, the measurement equation of the method is obtained, the measurement algorithm and the generalized scheme of the device implementing the method are developed, and the value of the expected uncertainty of the measurement results is given. The simulation results showed that the relative uncertainty provided by the presented method does not exceed 1.5 %. The developed method makes it possible to significantly increase the accuracy and expand the studied dynamic ranges of the required values for a wide range of gas flows. The method can be used in the flow measurement of gas-air flows.

Keywords

thermal anemometry, gas flow, thermal inertia, speed, heat transfer coefficient, step action, overheating, delay, signal

For citation: Khodunkov V.P. On the possibility of expanding the studied dynamic ranges in thermal anemometry. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 992–998 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-992-998

Введение

При исследованиях тепло- и гидродинамических параметров газовых потоков в настоящее время широко используют термоанемометрические методы, которые имеют следующие достоинства: высокая чувствительность и достаточно простая вторичная аппаратура, применяемая для измерений сигналов первичных преобразователей.

Отметим, что данные методы обладают недостатками, среди которых наиболее ощутимые — недостаточная точность и ограничение по верхнему пределу скорости измеряемого газового потока. В связи с этим востребована разработка новых методов термоанемометрии, позволяющих повысить точность и скоростной предел. В настоящей работе рассмотрен новый метод, который является перспективным и имеет возможность решить перечисленные проблемы.

Обзор существующих решений

Рассмотрим наиболее известные термоанемометрические методы [1–14], которые имеют сходство с предложенным методом.

Метод измерения скорости газового потока. Измерение осуществляется путем регистрации изменения температуры нагреваемой электричеством металлической проволоки (преобразователя расхода), помещенной в контролируемый поток газа. Охлаждение преобразователя зависит от скорости протекающего потока, физических свойств газа (теплопроводности, температуры и плотности) и от разности температур преобразователя и газа [1]. Данный метод имеет две разновидности:

— метод постоянного тока, в котором ток, нагревающий проволоку, поддерживается постоянным и измеряется с помощью сопротивления. Параметры и питание мостовой схемы, в которую подключено сопротивление, подбираются так, чтобы при нулевой скорости газа она находилась в равновесии.

Отклонение стрелки гальванометра служит мерой скорости потока. Данный метод обладает достаточной чувствительностью только при малых скоростях контролируемых потоков и непригоден для измерения больших скоростей ($v > 0,5$ м/с);

— метод постоянной температуры [8, 13], в котором сопротивление преобразователя, охлаждаемого контролируемым потоком, поддерживается постоянным путем регулирования напряжения нагрева (напряжения питания мостовой схемы). Это напряжение или ток питания моста служит мерой скорости контролируемого потока. Основные недостатки метода — сильная зависимость результатов измерений от температуры исследуемого потока, что влечет за собой необходимость индивидуальной градуировки термоанемометра для каждой отдельно взятой температуры потока; существенное снижение чувствительности термоанемометра с ростом скорости потока.

Метод термоанемометрических измерений. Измерение проводится с помощью пропускания через термочувствительный элемент импульсного тока, нагрева и охлаждения термочувствительного элемента до фиксированного температурного значения, регистрируют действующее значение импульсного тока, протекающего через термочувствительный элемент [2]. В данном методе контролируемым параметром при измерениях является действующее значение импульсного тока, протекающего через термочувствительных элемент, который позволяет устранить влияние помех на результаты измерений в виде быстроменяющихся температур окружающей термочувствительный элемент среды и обеспечить повышение точности измерений. Недостаток метода — невозможно измерить коэффициент теплоотдачи в газовом потоке, и определить связь требуемой амплитуды импульсного тока со скоростью газового потока, что существенно ограничивает применение метода.

Метод измерения скорости потока жидкости или газа. В потоке располагают термочувствительные преобразователи для измерения температуры и скорости

потока (термоанемометр). Если разность температур термочувствительных преобразователей (перегрев) находится в пределах заданного диапазона, то мощность нагрева постоянна. Если перегрев термоанемометра выходит за пределы заданного диапазона, то мощность нагрева изменяют до попадания перегрева в заданный диапазон. Значение измеряемой скорости потока вычисляют по формуле с учетом измеренного перегрева и мощности нагрева [3].

Метод измерения параметров газовых и жидких сред. В исследуемую среду помещают термочувствительный элемент, через который пропускают импульсный электрический ток. При скачкообразном изменении тока регистрируют момент начала скачка и момент установления процесса изменения электрического сопротивления термочувствительного элемента. Далее определяют временной интервал между полученными моментами времени, по которым находят искомые параметры измеряемых сред [4]. Недостаток метода — относительно низкая точность измерений, вызванная зависимостью показаний термочувствительного элемента от химического и структурного состава исследуемой среды, также метод не обеспечивает возможность измерения коэффициента теплоотдачи.

Метод определения скорости потока газа. В потоке газа размещают тепловыделяющий и термочувствительный элементы. Нагревают тепловыделяющий элемент, регистрируют изменение напряжения с термочувствительного элемента, по которому определяют скорость потока газа. При этом тепловыделяющий и следующий за ним термочувствительный элемент разносят в пространстве по направлению потока, при этом тепловыделяющий элемент нагревают в импульсном или частотно-импульсном режиме. В процессе прохождения потока газа последовательно регистрируют импульсы напряжения с нагретого тепловыделяющего и термочувствительного элементов и измеряют интервал времени между фронтами зарегистрированных импульсов, а скорость потока определяют с учетом измеренного интервала [5]. Недостаток метода — не предусмотрено измерение коэффициента теплоотдачи, и имеется ограничение по максимальной измеряемой скорости потока, которое оценивается значением 0,5 м/с.

Цель работы — разработка нового метода для совершенствования термоанемометрических измерений, направленное на повышение точности с одновременным расширением номенклатуры исследуемых потоков за счет увеличения верхнего скоростного предела и устранения влияния температуры потока на результат измерений.

Описание нового метода

В качестве теоретической основы предложенного метода использовано явление инерционности отклика любой термодинамической системы при ступенчатом тепловом воздействии. Указанное явление возникает при разнице нестационарных температур двух тел в одноименные моменты времени и при одновременном ступенчатом тепловом воздействии на тела, которые обладают разными тепловыми инерциями.

Различие температур тел напрямую связано с условиями теплообмена тел с окружающей средой, в частности — с коэффициентом теплоотдачи (α) и скоростью газового потока (v).

Возьмем два тела с существенно различающимися тепловыми инерциями и разместим в исследуемом газовом потоке (рис. 1). Ступенчатым тепловым воздействием нагреем тела до некоторой стационарной температуры, затем ступенчато прекратим нагрев и перейдем в режим охлаждения газовым потоком. В результате из-за различия в тепловых инерциях тел скорости их нагревания-охлаждения будут различны. Это приведет к температурному запаздыванию температуры одного тела относительно другого (рис. 2). Причем тело 1, например, обладающее меньшей тепловой инерцией, будет быстрее изменять свою температуру, чем тело 2, тепловая инерция которого значительно больше, и наоборот. Именно это положено в основу метода и обеспечивает необходимый технический результат.

Установим связь температурного различия с искомыми параметрами потока. Процесс нагревания-охлаждения любого тела при теплообмене его с окружающей средой при граничных условиях 3-го рода описывается известными температурными зависимостями из теории регулярного режима [15, 16].

Тогда в режиме нагрева нестационарные температуры тел 1, 2 (рис. 1) описываются соотношениями:

$$T_1(\tau_1) = T_0 + (T_{m1} - T_0)(1 - \exp(-m_1\tau_1)), \quad (1)$$

$$T_2(\tau_1) = T_0 + (T_{m2} - T_0)(1 - \exp(-m_2\tau_1)), \quad (2)$$

где $T_1(\tau_1)$ и $T_2(\tau_1)$ — текущие температуры тел 1, 2 в режиме нагрева соответственно; T_0 — начальная температура тел перед нагреванием (равна температуре исследуемого газового потока); T_{m1} и T_{m2} — стационарные температуры тел, достигнутые в результате нагревания; m_1 и m_2 — темпы нагревания-охлаждения тел (величина, обратная тепловой инерции); τ_1 — время, исчисляемое с момента начала нагревания.

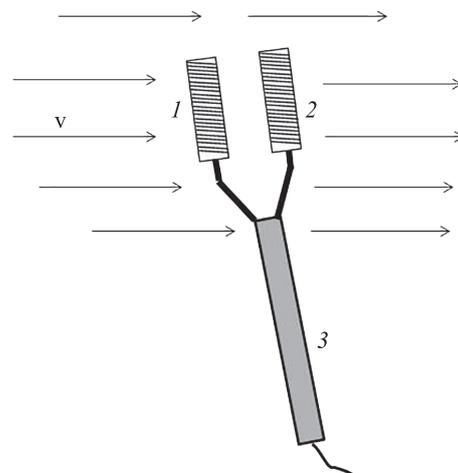


Рис. 1. Размещение термоанемометра в измеряемом газовом потоке: 1 — тело 1; 2 — тело 2; 3 — держатель

Fig. 1. Placement of thermoanemometer in the measured gas flow: 1 is body #1; 2 is body #2; 3 is holder for bodies

Режим охлаждения тел начинается при достижении температуры конечного стационарного значения T_{m1} и T_{m2} . В этом случае тела начинают охлаждаться (нагрев тел прекращен). В стадии регулярного режима изменения температур тел 1 и 2 во времени описываются соотношениями:

$$T_1(\tau_2) = T_{m1} - (T_{m1} - T_0)(1 - \exp(-m_1\tau_2)), \quad (3)$$

$$T_2(\tau_2) = T_{m2} - (T_{m2} - T_0)(1 - \exp(-m_2\tau_2)), \quad (4)$$

где $T_1(\tau_2)$ и $T_2(\tau_2)$ — текущие температуры тел в режиме охлаждения; τ_2 — время, исчисляемое с момента начала охлаждения.

Выполним нагрев тел одинаковой мощностью P , при этом полученные температуры T_{m1} и T_{m2} будут всегда различаться. Получим окончательные уравнения измерения предложенного метода. С этой целью приведем уравнения (1)–(4) к нормализованному виду. Для этого из обеих частей уравнений (1) и (2) вычтем температуру газового потока T_0 , а из (3) и (4) — температуру нагрева T_{mi} ($i = 1, 2$). Далее определим разность температур нагрева T_{mi} и газового потока T_0 .

В результате получим массив нормализованных перегревов каждого тела для режимов нагрева $\Delta T_1^*(\tau)$ и охлаждения $\Delta T_2^*(\tau)$ (рис. 2). Найдем разность перегревов тел в одноименные моменты времени: $\Delta(\Delta T^*(\tau)) = \Delta T_1^*(\tau) - \Delta T_2^*(\tau)$.

Общее уравнение для режимов нагрева (при $\tau = \tau_1$) и охлаждения (при $\tau = \tau_2$):

$$\Delta(\Delta T^*(\tau)) = \exp(-m_2\tau) - \exp(-m_1\tau). \quad (5)$$

Найдем момент времени τ_{\max} , при котором разница нормализованных перегревов тел будет максимальной, для этого определим частные производные от $\Delta(\Delta T^*(\tau))$ по времени. Из соотношения (5) следует:

$$\frac{\partial \Delta(\Delta T^*)}{\partial \tau} = m_1 \exp(-m_1\tau) - m_2 \exp(-m_2\tau). \quad (6)$$

Приравняем соотношение (6) к нулю и найдем экстремум функции $\Delta(\Delta T^*(\tau))$:

$$m_1 \exp(-m_1\tau_{\max}) = m_2 \exp(-m_2\tau_{\max}), \quad (7)$$

где τ_{\max} — среднее арифметическое из двух моментов времени, соответствующих максимальной разнице нормализованных перегревов ΔT^*_{\max} тел для режимов нагрева ($\tau_{1\max}$) и охлаждения ($\tau_{2\max}$) (рис. 2).

Для перехода к коэффициенту теплоотдачи α используем общеизвестное расчетное соотношение темпа нагревания-охлаждения любого тела, которое согласно теории регулярного теплового режима, имеет вид:

$$m = \frac{\alpha S}{C}, \quad (8)$$

где α — коэффициент теплоотдачи от тела к газовому потоку; S — площадь теплообменной (наружной) поверхности тела; C — полная теплоемкость тела.

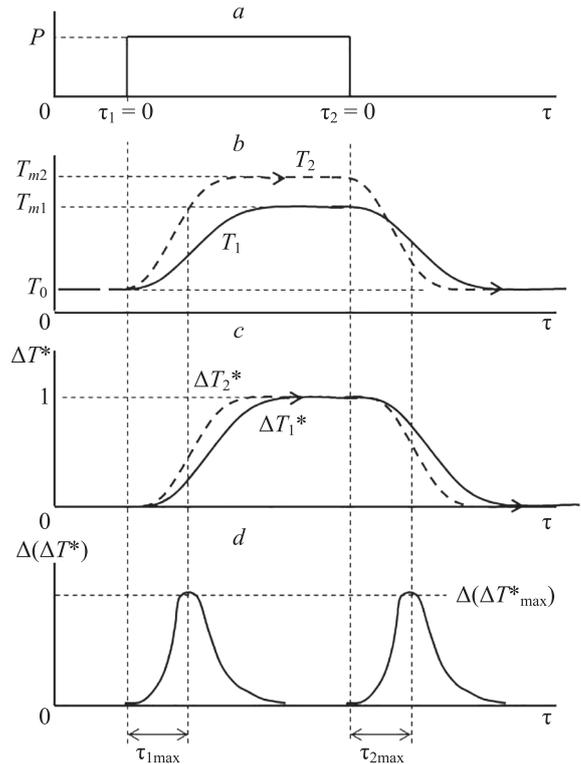


Рис. 2. Временная диаграмма, поясняющая теоретическую основу метода измерений: ступенчатое воздействие мощности нагрева (a); динамика изменения температуры тел в режиме нагрева и последующего охлаждения (b); динамика нормализованных перегревов тел в режиме нагрева и охлаждения (c); динамика различия нормализованных перегревов тел (d)

Fig. 2. Timing diagram explaining the theoretical basis of the measurement method: a) is the step effect of the heating power; b) is the dynamics of changes in body temperature in the mode of heating and subsequent cooling; c) is dynamics of normalized overheating of bodies in the mode of heating and cooling; d) is the dynamics of the difference in normalized overheating of bodies

Следуя (8), темп нагревания-охлаждения равен:

— для тела 1:

$$m_1 = \frac{\alpha_1 S_1}{C_1}, \quad (9)$$

— для тела 2:

$$m_2 = \frac{\alpha_2 S_2}{C_2}. \quad (10)$$

Отметим, что полные теплоемкости C_1, C_2 и площади наружной поверхности S_1, S_2 каждого тела заранее известны с заданной точностью.

Для устранения зависимости $Nu = f(Re)$, которая определяет размер обтекаемого тела, необходимо обеспечить следующие условия для исследования тел: идентичность условий теплообмена и одинаковые формы и размеры (т. е. $S_1 = S_2 = S$).

При соблюдении данных условий, с учетом того, что тела находятся в одном и том же газовом пото-

ке, коэффициенты теплоотдачи также одинаковы (т. е. $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$).

Предположим, что в зоне измерения профиль скорости либо отсутствует (скорость одинакова), либо настолько незначителен, что им можно пренебречь — одно из ограничений метода.

С учетом (9) и (10) получим отношение темпов нагревания-охлаждения тел:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{C_1}{C_2}. \quad (11)$$

Решим уравнение (7), подставив в него соотношения (9)–(11) относительно α . В результате получим уравнение измерения предложенного метода:

$$\alpha = \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) \left(\tau_{\max} \left(\frac{S(C_1 - C_2)}{C_2 C_1} \right) \right)^{-1}. \quad (12)$$

Из структуры уравнения измерения (12) следует, что для нахождения коэффициента теплоотдачи необходимо по экспериментально зарегистрированным температурам тел найти моменты времени $\tau_{1\max}$ и $\tau_{2\max}$, при которых разница нормализованных перегревов тел максимальна, и затем найти среднеарифметическое значение указанных времен. Таким образом, задача нахождения (измерения) коэффициента теплоотдачи решена.

Второй измеряемый параметр — скорость газового потока (v).

Как известно, интенсивность теплообмена в газовом потоке пропорциональна скорости потока: чем выше скорость потока, тем интенсивнее теплообмен и выше коэффициент теплоотдачи, т. е. $\alpha \sim v$. Следовательно, скорости потока также пропорционально время τ_{\max} , при котором наблюдается максимальная разница нормализованных перегревов тел. Из известных соотношений для критериальных чисел Рейнольдса (Re), Нуссельта (Nu) и соотношения (12) для газовых потоков следует, что время τ_{\max} пропорционально следующим параметрам:

$$\tau_{\max} \sim \left(\frac{\mu^n}{\lambda} \right) v^{-n},$$

где μ — кинематическая вязкость газа; λ — теплопроводность газа; n — численная константа.

Заметим, что численное значение комплекса (μ^n/λ) будет различно для разных газов и для одного и того же газа для разных температур. Это необходимо учитывать при реализации метода.

Для нахождения скорости газового потока v достаточно иметь предварительно полученную градуировочную зависимость времени τ_{\max} от скорости потока v , полученную на эталонном газовом потоке. Характерный вид такой зависимости $\tau_{\max}(v)$ представлен на рис. 3.

Под эталонным газовым потоком в настоящей работе подразумевается воздушный или иной поток, скорость которого заранее известна с заданной точностью. Полученная зависимость $\tau_{\max}(v)$ может быть распространена на газовые потоки и разные температуры одного и того же потока, для которых в пределах заданной точности близки значения отношения (v^n/λ) . Для других потоков и температур требуется отдельная градуировка

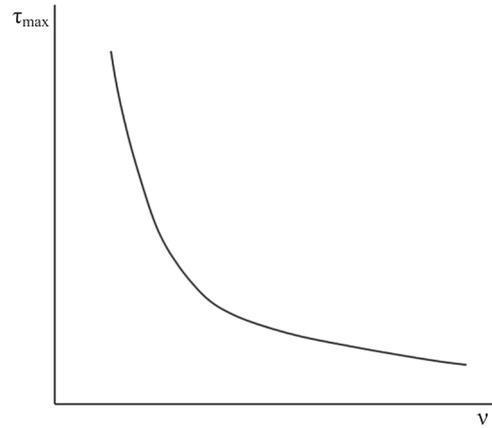


Рис. 3. Характерная зависимость времени, соответствующего максимальной разнице нормализованных перегревов тел (τ_{\max}), от скорости газового потока (v)

Fig. 3. Characteristic dependence of the time corresponding to the maximum difference in the normalized overheating of bodies vs. the gas flow rate

с использованием нового выбранного эталонного газа и диапазона температур.

Пример реализации метода

Рассмотрим работу и порядок использования предложенного метода на примере термоанемометра, обобщенная схема которого представлена на рис. 4. Отметим, что тела 1 и 2 размещены на специальном держателе и обладают существенно различающейся тепловой инерцией. В каждое тело встроено по

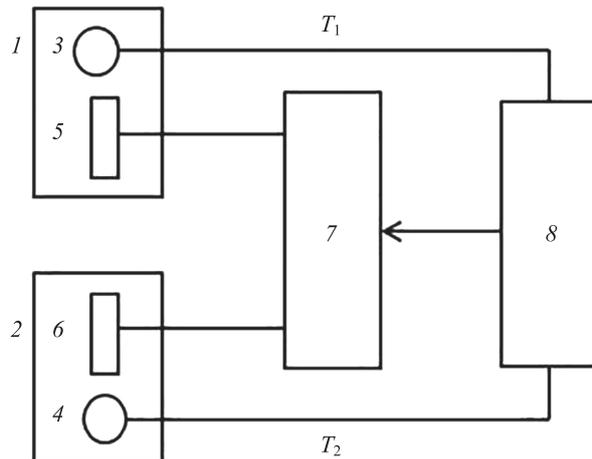


Рис. 4. Обобщенная структурная схема термоанемометра: 1, 2 — тела одинаковой заданной формы и размеров; 3, 4 — одинаковые малоинерционные термопреобразователи; 5, 6 — нагреватели; 7 — источник стабилизированного питания; 8 — блок управления и обработки сигналов; T_1, T_2 — температуры тел

Fig. 4. Common structural diagram for thermoanemometer: 1, 2 are bodies of the same specified shape and size; 3, 4 are identical low-inertia thermal converters; 5, 6 are heaters; 7 is a source of stabilized power supply; 8 is control and signal processing unit; T_1, T_2 are body temperatures

одному нагревателю 5, 6 и малоинерционному термопреобразователю 3, 4. Каждый нагреватель подключен к источнику стабилизированного питания 7. Термопреобразователи 3, 4 подключены к блоку управления и обработки сигналов 8.

Для удобства измерений электрические нагреватели выполнены одинакового номинала, а термопреобразователи — одного типа с одинаковой номинальной статической характеристикой, например, термопары типа ХК₆₈ (хромель-копель).

В процессе измерений тела помещают в измеряемый газовый поток, при этом с помощью термопреобразователей непрерывно выполняется регистрация температуры. При достижении равенства температур $T_{m1} = T_{m2} = T_0$, одновременно начинается нагрев тел 1 и 2. Для этого на нагреватели 5, 6 одновременно с помощью управляющего сигнала от блока 8 подают электрическую мощность P от источника стабилизированного питания 7 (рис. 2, а). Величину подаваемой мощности подбирают экспериментальным путем, руководствуясь тем, чтобы мощность была достаточной для обеспечения надежного измерения разности нормализованных перегревов тел. При этом продолжают регистрировать температуры исследуемых тел. После выхода тел на стационарный тепловой режим, их нагрев одновременно прекращают с помощью управляющего сигнала от блока 8 и источника стабилизированного питания 7 (рис. 2, б, в). Тела начинают охлаждаться газовым потоком — происходит режим охлаждения. При достижении обоими телами стационарной температуры, равной температуре измеряемого газового потока, управляющим сигналом от блока 8 прекращают регистрацию температуры тел. Процесс измерений на этом заканчивают и приступают к обработке результатов измерений, которую осуществляют согласно разделу настоящей работы «Описание нового метода» с помощью специальной компьютерной программы, заранее введенной в блок управления и обработки сигналов 8. С помощью программы по полученным температурным данным находят момент времени τ_{\max} , при котором имеет место максимальная разница нормализованных перегревов тел 1 и 2. Выполняется расчет искомых параметров, при этом используют уравнение измерения (12) и предварительно полученную градуировочную зависимость $\tau_{\max}(v)$.

Пример расчетного моделирования

Исходные расчетные соотношения. Для расчета значения коэффициента теплоотдачи используется уравнение (12), для нахождения скорости потока —

предварительно полученная градуировочная зависимость $\tau_{\max}(v)$, как показано на рис. 3.

Исходные данные. Пусть тела 1 и 2 выполнены в форме одинаковых сплошных цилиндров одинаковой длины $L = L_1 = L_2 = 0,02$ м и диаметром $d_1 = d_2 = 0,01$ м. При этом тело 1 изготовлено из алюминия с удельной теплоемкостью $c_1 = 920$ Дж/(кг·К) и плотностью $\rho_1 = 2712$ кг/м³, а тело 2 — из меди с удельной теплоемкостью $c_2 = 400$ Дж/(кг·К) и плотностью $\rho_2 = 8920$ кг/м³. Полная теплоемкость тела 1 равна $C_1 = c_1 \pi d_1^2 L_1 \rho_1 / 4 = 3,9$ Дж/К, тела 2 — $C_2 = c_2 \pi d_2^2 L_2 \rho_2 / 4 = 5,6$ Дж/К. Площади теплообменной поверхности обоих тел равны: $S = S_2 = S_1 = \pi d_1 L_1 + \pi d_1^2 / 2 = 7,85 \cdot 10^{-4}$ м². Рассчитаем отношения, входящие в уравнение измерения метода (12): $C_1 / C_2 = 0,7$; $S(C_1 - C_2) / (C_2 C_1) = -6,1 \cdot 10^{-5}$. Пусть, например, исследовался пылегазовый поток.

Результаты расчетов. В результате измерений и обработки данных получены следующие значения τ_{\max} :
— в режиме нагрева $\tau_{\max 1} = 122,3$ с;
— в режиме охлаждения $\tau_{\max 2} = 123,2$ с;
— среднеарифметическое значение $\tau_{\max} = 122,7$ с.

Рассчитанное значение коэффициента теплоотдачи, согласно уравнению (12), составляет величину 47,6 Вт/(м²·К).

Согласно градуировочной зависимости $\tau_{\max}(v)$ времени $\tau_{\max} = 122,7$ с соответствует скорость $v = 19,4$ м/с. Метод реализован, искомые параметры измерены.

Подробный расчет ожидаемой неопределенности результатов измерений метода в работе не приведен из-за объемистости. Инструментальная относительная неопределенность, обеспечиваемая современными средствами измерений, по оценке не превышает 1,5 %.

Заключение

В предложенном методе расширена номенклатура измеряемых потоков, обеспечена возможность одновременного измерения сразу двух параметров потока. Значительно повышен верхний скоростной предел, который обеспечивается за счет подбора соотношений полных теплоемкостей первичных преобразователей (их материалов). Частично, в пределах заданной точности, устранена зависимость результатов измерений от температуры потока, что повышает точность и расширяет область применения метода. Созданы перспективы для широкого применения метода в расходомерии воздушно-газовых потоков с более высокими скоростями (до нескольких десятков метров в секунду), что, безусловно, является значимым достижением данной разработки.

Литература

1. Измерения в промышленности: справочник. Т. 2 / под ред. П. Профоса. М.: Металлургия. 1990. С. 274–276.
2. Романченко А.Ф., Ряздымахо С.В. Способ термоанемометрических измерений. Патент RU 2217765. Бюл. 2003. № 14.
3. Купер В.Я., Рубцов М.Г., Хозинский Е.Ф., Шамихин А.Н. Способ измерения скорости потока жидкости или газа. Патент RU 2267790. Бюл. 2006. № 1.
4. Романченко А.Ф. Способ измерения параметров газовых и жидких сред. Авторское свидетельство 637676. Бюл. 1978. № 46.
5. Корзнев А.Н., Гаранин А.В. Способ определения скорости и температуры потока газа и устройство для его осуществления. Патент RU 2347227. Бюл. 2009. № 5.
6. Khamshah N., Abdalla A.N., Koh S.P., Rashag H.F. Issues and temperature compensation techniques for hot wire thermal flow sensor: A review // *International Journal of the Physical Sciences*. 2011. V. 6(14). P. 3270–3278. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.630>
7. Morris S.C., Foss J.F. Transient thermal response of a hot-wire anemometer // *Measurement Science and Technology*. 2003. V. 14. N 3. P. 251–259. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/3/302>
8. Palma J., Labbé R. Rugged constant-temperature thermal anemometer // *Review of Scientific Instruments*. 2016. V. 87. N 12. P. 125112. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4972585>
9. Kunkel G.J., Arnold C.B., Smits A.J. Development of NSTAP: nanoscale thermal anemometry probe // *Collection of Technical Papers — 36th AIAA Fluid Dynamics Conference*. 2006. V. 3. P. 1938–1945. <https://doi.org/10.2514/6.2006-3718>
10. Fu M.K., Fan Y., Hultmark M. Design and validation of a nanoscale cross-wire probe (X-NSTAP) // *Experiments in Fluids*. 2019. V. 60. N 6. P. 99. <https://doi.org/10.1007/s00348-019-2743-0>
11. Valiullin R., Sharafutdinov R., Fedotov V., Ramazanov A., Vakhitova G., Kosmylin D. A new radial-azimuth thermal anemometer for determining the direction and velocity of fluid flow in the wellbore // *Proc. of the SPE Russian Petroleum Technology Conference (RPTC)*. 2018. P. SPE-191565-18RPTC-MS. <https://doi.org/10.2118/191565-18RPTC-MS>
12. Грек Г.Р., Бойко А.В., Гилев В.М., Зверков И.Д., Сорокин А.М. Автоматизированная система сбора термоанемометрической информации в аэрофизическом эксперименте // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014. № 5-1. С. 11–14.
13. Ligęza P. Advanced temperature compensation and correction techniques in thermal anemometry // *Instrumentation Science & Technology*. 2015. V. 43. N 1. P. 21–43. <https://doi.org/10.1080/10739149.2014.942915>
14. Arlit M., Schleicher E., Hampel U. Thermal anemometry grid sensor // *Sensors (Basel)*. 2017. V. 17. N 7. P. 1663. <https://doi.org/10.3390/s17071663>
15. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат, 1954. 408 с.
16. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена: учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 195 с.

Автор

Ходунков Вячеслав Петрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, orcid.org/0000-0001-9208-7462, walkerearth@mail.ru

References

1. *Handbuch der industriellen Messtechnik*. Ed. by P. Profos. Essen, Vulkan-Verlag, 1987.
2. Pomanchenko A.F., Razdymakho S.V. Method of thermal and anemometric measurements. *Patent RU 2217765*. 2003. (in Russian)
3. Kuper V.J., Rubtsov M.G., Khozinskij E.F., Shamikhin A.N. Method of measuring of a gas or liquid flow speed. *Patent RU 2267790*. 2006. (in Russian)
4. Pomanchenko A.F. A method for measuring the parameters of the gas and liquid medium. *Patent 637676*. 1978. (in Russian)
5. Korznev A.N., Garanin A.V. Method of determination of velocity and temperature of gas stream and device for its realization. *Patent RU 2347227*. 2009. (in Russian)
6. Khamshah N., Abdalla A.N., Koh S.P., Rashag H.F. Issues and temperature compensation techniques for hot wire thermal flow sensor: A review. *International Journal of the Physical Sciences*, 2011, vol. 6(14), pp. 3270–3278. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.630>
7. Morris S.C., Foss J.F. Transient thermal response of a hot-wire anemometer. *Measurement Science and Technology*, 2003, vol. 14, no. 3, pp. 251–259. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/3/302>
8. Palma J., Labbé R. Rugged constant-temperature thermal anemometer. *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87, no. 12, pp. 125112. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4972585>
9. Kunkel G.J., Arnold C.B., Smits A.J. Development of NSTAP: nanoscale thermal anemometry probe. *Collection of Technical Papers — 36th AIAA Fluid Dynamics Conference*. Vol. 3, 2006, pp. 1938–1945. <https://doi.org/10.2514/6.2006-3718>
10. Fu M.K., Fan Y., Hultmark M. Design and validation of a nanoscale cross-wire probe (X-NSTAP). *Experiments in Fluids*, 2019, vol. 60, no. 6, pp. 99. <https://doi.org/10.1007/s00348-019-2743-0>
11. Valiullin R., Sharafutdinov R., Fedotov V., Ramazanov A., Vakhitova G., Kosmylin D. A new radial-azimuth thermal anemometer for determining the direction and velocity of fluid flow in the wellbore. *Proc. of the SPE Russian Petroleum Technology Conference (RPTC)*, 2018, pp. SPE-191565-18RPTC-MS. <https://doi.org/10.2118/191565-18RPTC-MS>
12. Grek G.R., Boyko A.V., Gilyov V.M., Zverkov I.D., Sorokin A.M. The automated system of hot-wire anemometer information acquisition in the aerophysical experiment. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2014, no. 5-1, pp. 11–14. (in Russian)
13. Ligęza P. Advanced temperature compensation and correction techniques in thermal anemometry. *Instrumentation Science & Technology*, 2015, vol. 43, no. 1, pp. 21–43. <https://doi.org/10.1080/10739149.2014.942915>
14. Arlit M., Schleicher E., Hampel U. Thermal anemometry grid sensor. *Sensors (Basel)*, 2017, vol. 17, no. 7, pp. 1663. <https://doi.org/10.3390/s17071663>
15. Kondratev G.M. *Regular Thermal Conditions*. Moscow, Gostehizdat Publ., 1954, 408 p. (in Russian)
16. Dulnev G.N. *Theory of Heat and Mass Transfer*. Tutorial. St. Petersburg, NIU ITMO, 2012, 195 p. (in Russian)

Author

Vyacheslav P. Khodunkov — PhD, Senior Researcher, D.I. Mendeleev Institute for Metrology, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, orcid.org/0000-0001-9208-7462, walkerearth@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.06.2022
Одобрена после рецензирования 14.07.2022
Принята к печати 18.09.2022

Received 01.06.2022
Approved after reviewing 14.07.2022
Accepted 18.09.2022