

УДК 536.24

Закономерности теплообмена термоанемометрической нити*

Н.И. Михеев, А.В. Саховский, К.Р. Хайрнасов, Д.В. Кратиров

Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра РАН

*Казанский государственный технический университет
им. А.Н. Туполева*

E-mail: n.miheev@mail.ru

Получены и обобщены экспериментальные данные по теплообмену тонкой нити в широком диапазоне чисел Рейнольдса, характерном для термоанемометрии. Эксперименты выполнены с использованием цифрового термоанемометра ИРВИС-ТА5 и эталонных критических сопел для контроля расхода в рабочем участке камеры Эйфеля, где устанавливался датчик. Обоснованы подходы к выполнению термоанемометрических измерений без трудоемкой градуировки датчика.

Ключевые слова: цифровой термоанемометр, теплообмен цилиндра.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительный прогресс в развитии методов и средств диагностики газовых потоков, достигнутый в последние десятилетия, основным средством измерения характеристик турбулентности и спектров пульсаций скорости потока по-прежнему остается термоанемометр. Это обусловлено лучшими частотными характеристиками термоанемометра постоянного сопротивления по сравнению с лазерным доплеровским анемометром (ЛДА) и системами измерения мгновенных полей скорости PIV (Particle Image Velocimetry). К тому же термоанемометры доступнее ЛДА и PIV.

Системы PIV позволяют одновременно регистрировать большое количество частиц-трассеров и измерять все поле течения, но их быстродействие обычно не превышает 10 измерений в секунду. Частотные характеристики ЛДА также существенно ограничены частотой попадания частиц-трассеров в измерительный объем и временем пролета этого объема. При постоянном сопротивлении нити термоанемометра практически исключается ее тепловая инерционность, что обеспечивает измерение пульсационной составляющей скорости потока в весьма широком частотном диапазоне — до 10 кГц и выше.

Поскольку термоанемометры остаются наиболее доступным и универсальным средством измерения турбулентных характеристик потока, они нашли широ-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант № НШ-4334.2008.8) и РФФИ (проекты № 07-08-00330, 08-08-12181-офи, 09-08-00597-а).

кое применение как в научных исследованиях, так и в промышленности, а ведущие мировые производители DANTEC Electronic (DISA), TSI Incorp. (США) и некоторые другие постоянно совершенствуют эти приборы. Стремятся упростить их настройку перед измерениями, снизить влияние температуры среды на результат измерения скорости потока, упростить трудоемкую градуировку датчиков перед измерениями. Для существующих приборов обычно необходима градуировка датчика в той же среде, что и при измерениях, во всем диапазоне интересующих скоростей потока.

Отмеченные недостатки существующих термоанемометров связаны не с принципом их работы, а с приборной реализацией. Физический принцип термоанемометра, основанный на фундаментальных закономерностях теплообмена при поперечном обтекании тонкой нити, допускает подход к выполнению измерений скорости потока без предварительной градуировки датчика и с компенсацией влияния температуры без использования дополнительной нити, причем при различных температурах потока и в различных средах с известными свойствами. Для реализации такого подхода необходима надежная информация о теплообмене тонких нитей при свободной конвекции и в диапазоне малых чисел Рейнольдса, представляющем интерес при термоанемометрических исследованиях. В настоящей работе предпринята попытка экспериментального определения и обобщения такой информации.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В термоанемометрии обычно используют нити диаметром не более 6 мкм. При обдуве такой тонкой нити, например, воздухом при нормальных условиях в диапазоне скоростей потока 0,05...50 м/с число Рейнольдса составляет 0,02...20. Для теплообмена при поперечном обтекании кругового цилиндра в области таких низких Re в работах [1–6] предложен ряд зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} \text{Nu}_f &= \left(0,35 + 0,62 \text{Re}_f^{0,4}\right) \text{Pr}_f^{0,37} \left(\text{Pr}_f/\text{Pr}_w\right)^{0,25}, \text{Re} \leq 1 \\ \text{Nu}_f &= 0,76 \text{Re}_f^{0,4} \text{Pr}_f^{0,37} \left(\text{Pr}_f/\text{Pr}_w\right)^{0,25}, \text{Re} = 1 \div 40 \end{aligned} \right\}, \quad [1]$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Nu} &= 0,875 \text{Re}^{0,31} \quad \text{Re} = 1 \div 4 \\ \text{Nu} &= 0,785 \text{Re}^{0,39} \quad \text{Re} = 4 \div 40 \end{aligned} \right\}, \quad [2]$$

$$\text{Nu} = 0,99 \text{Pr}^{0,4} \text{Re}^{0,305}, \quad 1 < \text{Re} < 40, \quad [3]$$

$$\text{Nu}_m = 0,42 \text{Pr}_m^{0,2} + 0,57 \text{Pr}_m^{0,33} \text{Re}_m^{0,5}, \quad \text{Re}_m = 0,01 \div 10^4, \quad [4]$$

$$\text{Nu}_m = \left(0,24 + 0,56 \text{Re}_m^{0,45}\right) \left(T_m/T_f\right)^{0,17}, \quad \text{Re}_m = 0,02 \div 44, \quad [5]$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Nu} &= 0,3 + \sqrt{\text{Nu}_{\text{лам}}^2 + \text{Nu}_{\text{турб}}^2}, \quad 1 < \text{Re}_1 < 10^7 \\ \text{Nu} &= 0,75 (\text{Re}_1 \text{Pr})^{1/3}, \quad \text{Re}_1 < 1 \end{aligned} \right\}. \quad [6]$$

$$\text{Здесь } \text{Nu}_{\text{лам}} = 0,664 \text{Re}_1^{1/2} \text{Pr}^{0,333}, \quad \text{Nu}_{\text{турб}} = \frac{0,037 \text{Re}_1^{0,8} \text{Pr}}{1 + 2,443 (\text{Pr}^{0,667} - 1) / \text{Re}_1^{0,1}}.$$

Как следует из приведенных зависимостей, в качестве определяющей температуры для теплофизических свойств принимают либо температуру среды T_f либо температуру $T_m = 0,5(T_f + T_w)$, где T_w — температура стенки (нити). Для работ,

в которых определяющая температура не указана, приведены числа подобия без индексов. В исследовании [6] число Рейнольдса Re_1 определяется не по диаметру цилиндра d , как в других работах, а по $l = \pi d/2$.

Приведенные выше зависимости при $T_f = 293$ К и $T_w = 493$ К представлены на рис. 1, на границах диапазонов имеются разрывы. Как видно, отличие между ними по Nu составляет десятки процентов. Такая погрешность не имеет принципиального значения для многих прикладных задач по оценке теплообмена, но в термоанемометрии может привести к значительным погрешностям измерений скорости потока. Кроме того, не все зависимости охватывают интересующий диапазон Re и описывают состояние при $Re = 0$. Поэтому в настоящей работе экспериментально определены закономерности теплообмена термоанемометрической нити.

Эксперименты выполнялись с использованием цифрового термоанемометра постоянного сопротивления ИРВИС-ТА5 (Казань) [7]. Поскольку сопротивление нити однозначно связано с ее геометрическими характеристиками и температурой, постоянство сопротивления практически эквивалентно постоянству температуры. Изменение температуры нити по ее длине в основном происходит из-за утечек тепла к ножкам датчика, а по радиусу — вследствие теплообмена с набегающим потоком. Эти изменения пренебрежимо малы при длине нити, превышающей поперечный размер почти на три порядка величины, и многократно большей температуропроводности нити по сравнению с измеряемой средой. В предположении неизменной температуры нити чувствительного элемента по всей ее длине в [7] записана математическая модель работы термоанемометра постоянного сопротивления. В ней также использовались некоторые другие допущения. Коэффициент теплоотдачи α между текучей средой и нитью считался неизменным по длине нити, но изменяющимся по времени. Температура среды принималась постоянной. Кроме того, согласно выполненному в [8] обоснованию, пренебрежимо малыми считались утечки тепла к ножкам датчика, тепловой поток от нити к среде за счет излучения и изменение теплосодержания нити за счет изменения ее температуры. При принятых допущениях в [7] получена связь теплообмена с электрическими параметрами и свойствами среды

$$Nu_m = \frac{4J^2 \rho_r (1 + \alpha_t (t_w - 20))}{\pi^2 d_w^2 \lambda_m (t_w - t_f)}, \quad (1)$$

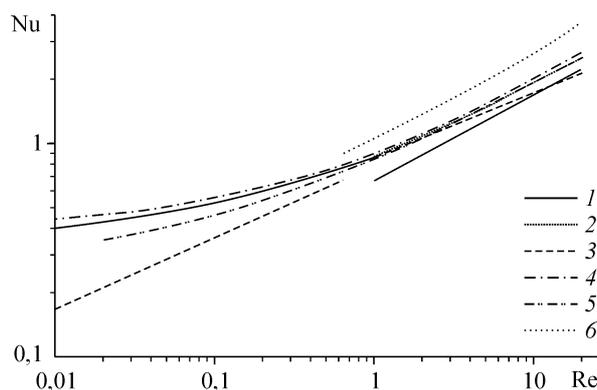


Рис. 1. Литературные данные $Nu(Re)$ из работ: [1], $Re < 1$ и $Re > 1$ (1); [2], $Re < 4$ и $Re > 4$ (2); [3] (3); [4] (4); [5], (5); [6], $Re_1 < 1$ и $Re_1 > 1$ (6).

где J — ток, протекающий через чувствительный элемент, A , ρ_r — удельное сопротивление, Ом м, α_t — температурный коэффициент сопротивления материала чувствительного элемента, K^{-1} , t_w и t_f — температуры чувствительного элемента и окружающей среды, K , d_w — диаметр нити чувствительного элемента, м, λ_m — коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К).

Из (1) следует, что в данной постановке задачи для определения значения Nu необходимо знать свойства среды и материала нити чувствительного элемента, температуры нити и среды, а также измерять силу электрического тока через нить. Зависимость электрического сопротивления нити от ее температуры

$$R_n = R_{20}(1 + \alpha_t(t_w - 20)) \quad (2)$$

позволяет определить разность температур ($t_w - t_f$) на основе измерений сопротивления нити. В термоанемометре ИРВИС-ТА5 реализованы функции автоматической балансировки моста при температуре потока и установки заданной разности температур нити и потока. Режим периодической балансировки моста позволяет автоматически компенсировать влияние дрейфа температуры среды на измерение скорости потока.

Следует обратить внимание, что длина нити выражена через сопротивление и напрямую в (1) не входит. Это означает, что переход от традиционного измерения падения напряжения на нити к измерению силы тока, проходящего через нить, позволит иметь универсальную зависимость $Nu(Re)$ при разных длинах нитей. Поскольку к термоанемометрическому мосту нить подключалась через кабель, перед экспериментами выполнялось измерение сопротивления кабеля, которое учитывалось при обработке данных.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Термоанемометрический датчик 1 устанавливался в рабочей части камеры Эйфеля 2, в которой создавался равномерный поток атмосферного воздуха с помощью плавного входа, имеющего диаметр выходного сечения 51,5 мм. Стабильный расход воздуха поддерживался и измерялся с помощью набора поверенных эталонных критических сопел 3, имеющих погрешность не более 0,25 %. Быстросъемные сопла располагались на герметичной перегородке ресивера 3. Необходимый для обеспечения критического режима истечения перепад давления на соплах обеспечивался турбокомпрессором 4. При работе на микросоплах использовались два вакуумных насоса. Установка позволяла также работать без использования критических сопел (при открытых отверстиях в перегородке ресивера) с использованием для измерения расхода вихревого расходомера ИРВИС-К300 5 с относительной погрешностью не более 1 %. В этом случае использовался регулятор расхода, расположенный перед расходомером.

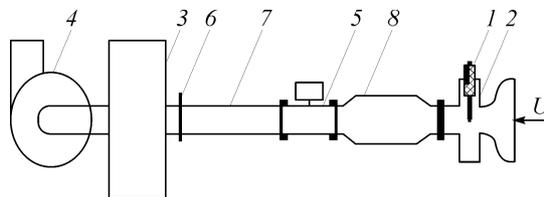


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

1 — термоанемометрический датчик, 2 — камера Эйфеля, 3 — ресивер с набором критических сопел, 4 — турбокомпрессор (вакуумный насос), 5 — вихревой расходомер ИРВИС-К300, 6 — регулятор расхода, 7 — поствключенный участок, 8 — устройство для выравнивания потока перед расходомером.

В экспериментах контролировался перепад давления на критических соплах, выполнялись измерения температуры воздуха с помощью платинового термометра сопротивления ПТП-100 (преобразователь температуры платиновый, ЗАО “Терми-ко”, Москва) и давления перед соплами с помощью датчиков Прома-ИДМ (измеритель давления многофункциональный, ООО “Прома”, Казань). Эксперименты выполнялись в диапазоне расходов от 0,5 до 250 м³/ч, соответствующих скорости потока в камере Эйфеля 0,06...33 м/с, а также в условиях свободной конвекции (без потока, при заглушенном рабочем участке).

Предварительно выполнялись методические эксперименты по определению степени равномерности потока в рабочей зоне камеры Эйфеля. В них термоанемометрический датчик с помощью координатного устройства перемещался от оси к внешней границе с шагом 2 мм. Измерения при вертикальном и горизонтальном положениях оси камеры Эйфеля показали, что в обоих случаях во всем диапазоне расходов воздуха профиль скорости остается равномерным (рис. 3).

Равномерность потока в камере Эйфеля позволяет получить простую связь скорости потока в ее рабочей части с номинальным расходом через критические сопла, с учетом поправок на температуру и перепад давлений, имеющую вид

$$U = \frac{Q}{3600 \mu S} \left(1 - \frac{\Delta p}{p_{\text{атм}}} \right) \sqrt{\frac{t_f + 273,15}{293,15}}, \quad (3)$$

где Q — номинальное значение расхода критических сопел при 20 °С, м³/ч, μ — коэффициент расхода входного устройства, S — площадь рабочего сечения, м², Δp — перепад давления между камерой Эйфеля и ресивером перед критическими соплами, Па, $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление, Па, t_f — температура воздуха, °С. Согласно нормативной документации [9], распространяющейся на сопла с близкой к использованной в камере Эйфеля формой, принято $\mu = 0,9887$.

Алгоритм обработки данных реализован в термоанемометре ИРВИС-ТА5 с соответствующим программным обеспечением микроконтроллера, входящего в его состав. В качестве исходных данных использовались характеристики нити (диаметр, предварительно измеренный температурный коэффициент сопротивления), сопротивление кабеля, скорость потока, данные по зависимости теплофизических свойств воздуха от температуры. Длина нити не измерялась и напрямую

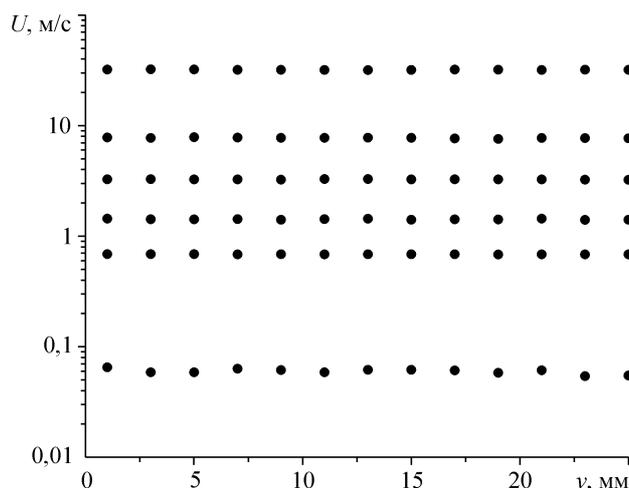


Рис. 3. Профили скорости в камере Эйфеля при вертикальном (4 нижних) и горизонтальном (2 верхних) расположении оси.

в расчетах не использовалась. Результаты измерения и обработки данных выводились как на индикатор, так и на ПК по интерфейсу RS-232 или RS-485. Регистрировались значения тока через нить, сопротивления нити, ее перегрева относительно температуры набегающего потока и некоторые другие параметры.

В экспериментах использовались два термоанемометрических датчика с вольфрамовой нитью диаметром 6 мкм и один датчик с нитью 8 мкм. Эксперименты проводились при трех перегревах $\delta t = t_w - t_f$ нити датчика: 100, 150 и 200 °С относительно температуры воздуха.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При обобщении закономерностей теплообмена при поперечном обтекании цилиндра в области малых Re в литературе, как уже отмечалось выше, используют разные определяющие температуры. Однако анализ экспериментальных данных авторов показал, что в координатах $Nu_f(Re_f)$ данные при различных перегревах нити расслаиваются и плохо обобщаются. В качестве обобщающей температуры в области малых Re следует использовать именно среднюю температуру между средой и поверхностью теплообмена. Экспериментальные данные в координатах $Nu_m(Re_m)$, полученные на разных экземплярах прибора ИРВИС-ТА5 для трех датчиков с нитями различных длин и диаметров при разных величинах перегрева нитей, представлены на рис. 4. Как видно, данные при различных перегревах и диаметрах нити для Nu_m и Re_m , в которых теплофизические свойства определены при средней температуре между воздухом и нитью, практически совпадают. Полученные экспериментальные значения также укладываются в диапазон $Nu(Re)$ по литературным данным (см. рис. 1).

Следует отметить, что при обработке экспериментальных данных использовался номинальный диаметр нити по техническим условиям на вольфрамовую проволоку, поскольку измерения под микроскопом с учетом их погрешности не привели к уточнению результата. Возможные отклонения диаметра нити от номинала могли привести к пропорциональному смещению Nu_m без искажения характера зависимости $Nu_m(Re_m)$.

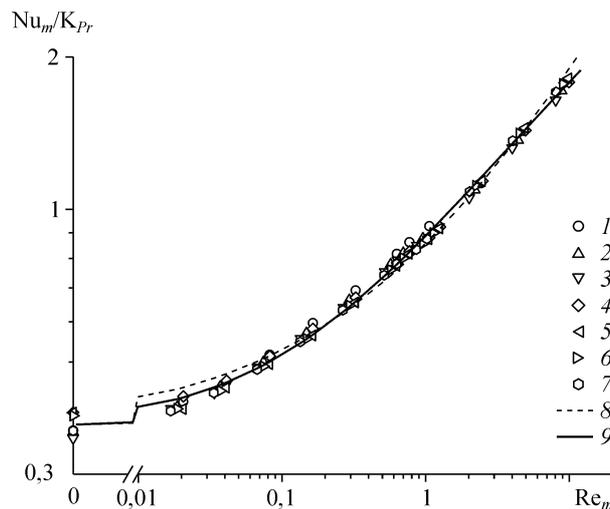


Рис. 4. Теплообмен нити: экспериментальные данные: $d = 6$ (1–3, 5–7), 8 (4) мкм, $\delta t = 100^\circ$ (1–5), 150° (2, 6), 200° (3, 4, 7), 8, 9 — эмпирические зависимости (4), (5) соответственно.

В экспериментах только на воздухе число Прандтля изменялось в зависимости от перегрева нити в узком диапазоне, который не позволял оценить влияние Pr на теплообмен нити. Между тем, анализ поправок на влияние Pr по работам [1–6] показал их малое отличие между собой, во всяком случае, для газов с Pr , близким к 1. В настоящей работе использовали поправку [1], с учетом которой полученные экспериментальные данные обобщены зависимостями:

$$\frac{Nu_m}{K_{Pr}} = 0,376 + 0,482 Re_m^{0,5}, \quad (4)$$

$$\frac{Nu_m}{K_{Pr}} = 0,376 + 0,511 Re_m^{0,5-0,026 \cdot \ln Re_m}, \quad (5)$$

где

$$K_{Pr} = Pr_m^{0,37} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}. \quad (6)$$

Расчетные значения по (4) и (5) показаны линиями на рис. 4. При оценке параметров этих зависимостей по экспериментальным данным минимизировалось относительное среднеквадратическое отклонение между предсказанными Nu и экспериментальными $Nu_{э}$ значениями

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{Nu_i - Nu_{э_i}}{Nu_{э_i}} \right)^2}{N - k}}, \quad (7)$$

где N и k — число экспериментальных точек и оцениваемых параметров соответственно. Оценки σ для зависимостей (4) или (5) составили, соответственно, 0,0422 и 0,0234. Таким образом, при реализованном в эксперименте 500-кратном изменении Re экспериментальные данные по теплообмену несколько лучше описываются зависимостью (5), в которой показатель степени записан в виде функции от Re .

Зависимости (4) или (5) совместно с (1) можно использовать для определения скорости потока с помощью цифрового термоанемометра без предварительной градуировки датчика. По измеренному текущему значению силы тока J при известных параметрах нити и среды Nu_m вычисляется по (1) и подставляется в (4) или (5). Из полученного уравнения определяется Re_m , от которого при известных значениях диаметра нити и вязкости среды осуществляется переход к скорости потока. Если измерения выполнять с периодической балансировкой моста (измерением температуры среды), такой подход позволяет автоматически исключать влияние температуры среды на результат измерения скорости потока, поскольку в уравнении (1) используется разность температур нити и среды.

В практике термоанемометрических измерений часто возникает некоторая неопределенность данных по теплофизическим свойствам среды и характеристикам нити, прежде всего по ее диаметру. Предпочтительным представляется подход с калибровкой системы измерений по точке в условиях свободной конвекции в той же самой среде, тем более что такой режим обычно очень прост в реализации, во всяком случае, по сравнению со стандартной градуировкой во всем диапазоне скоростей потока. Поскольку сила тока J_0 при калибровке без потока измеряется для той же самой нити, в той же среде и при таком же перегреве, что и при измерениях, большинство неопределенностей, в том числе по свойствам нити и среды,

исключается, как это следует из (1). Действительно, если представить зависимость от Re относительного теплообмена Nu_m/Nu_{m0} (Nu_{m0} — в условиях без обдува нити) или $(Nu_m - Nu_{m0})/Nu_{m0}$, то многие величины, входящие в (1), сократятся и исключится их влияние на погрешность измерения. С учетом этого уравнение для определения Re_m примет вид

$$\frac{J^2}{J_0^2} = \frac{0,376 + 0,511 Re_m^{0,5 - 0,026 \ln Re_m}}{0,376}. \quad (8)$$

При использовании такой калибровки в условиях свободной конвекции некоторая, многократно меньшая, неопределенность результата измерений, связанная с погрешностью определения диаметра нити и вязкости среды, останется лишь на этапе обратного перехода от Re_m к скорости потока или к ρU . Однако при использовании универсальной зависимости и эта неопределенность может быть устранена калибровкой по единственной дополнительной (к условиям без обдува нити) точке при известной скорости потока. Действительно, при известном токе J в точке с известной скоростью потока U в определенной среде из Re_m , полученного из (8), можно определить отношение диаметра нити к вязкости среды и использовать его при измерениях.

В цифровом термоанемометре ИРВИС-ТА5 предусмотрены как описанные подходы к измерениям без градуировки датчика или с калибровкой в условиях без обдува нити и с дополнительной точкой при известной скорости потока, так и с полной градуировкой датчика во всем диапазоне скоростей потока. По мере программной реализации новых подходов подключение новых функций возможно путем простого обновления программного обеспечения микроконтроллера в составе прибора.

ВЫВОДЫ

В широком диапазоне чисел Рейнольдса и температурного напора получены универсальные закономерности теплообмена тонкой нити. Их использование в цифровом термоанемометре позволит выполнять измерения скорости потока без предварительной градуировки датчика или существенно упростить получение градуировочной зависимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 473 с.
2. Hilpert R. Wärmeabgabe von geheizten Drahten und Röhren in Luftstrom // Forsch. Ingenieurw. 1933. Bd. 4. S. 215–224.
3. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
4. Kramers H. Heat transfer from spheres to flowing media // Physica, 1946. No. 12. P. 61–80.
5. Collis D.C., Williams M.I. Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers // J. Fluid Mech. 1959. No. 6. P. 357–384.
6. Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т. 1/ Пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат. 1987, 560 с.
7. Михеев Н.И., Молочников В.М., Кратиров Д.В., Хайриасов К.Р. Основы метода термоанемометрических измерений без градуировки датчика // Известия РАН. Энергетика. 2008. № 5. С. 34–38.
8. Устименко Б.П., Змейков В.Н., Шишкин А.А. Термоанемометрические методы исследования турбулентности в газовых потоках и факелах. Алма-Ата: Наука, 1983. 179 с.
9. Рекомендация. ГСИ. Критические расходомеры. Методика выполнения измерений массового расхода газа. МИ 1538-86. Казань: ФГУП ВНИИФТРИ, 1986. 46с.

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2009 г.