

В. И. Лысенко, Д. Ю. Труфанов, С. П. Бардаханов

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: vl@itam.nsc.ru

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНИМОСТИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В ПОТОКЕ НАНОПОРОШКА *

Работа посвящена подробному исследованию характеристик датчика термоанемометра в потоке нанопорошка диоксида кремния. Определены универсальные (при различных перегревах) тарировочные зависимости напряжения термоанемометра и числа Нуссельта от средней скорости потока нанопорошка. Показано, что термоанемометром в потоке нанопорошка измеряются пульсации скорости течения.

Ключевые слова: нанопорошок, термоанемометр, тарировочная зависимость, средняя скорость, пульсации.

Введение

Течения наноразмерных порошков изучены крайне недостаточно. Отметить можно только две работы авторов [1–2], в которых для решения поставленной задачи был успешно применен термоанемометр (при одном перегреве нити). Однако возник вопрос о более детальном исследовании применимости термоанемометра для определения параметров потока нанопорошка, влияния перегрева нити датчика, построении универсальных тарировочных зависимостей, определении числа Нуссельта. Оставался открытым вопрос, какие именно пульсации определяются с помощью термоанемометра в потоке нанопорошка. Поэтому авторами были проведены дополнительные исследования в соответствии с методологией работ [3–5].

Техника и методика эксперимента

Основным элементом экспериментальной установки, аналогичной установке, опи-

санной в работе [1], являлся цилиндрический пластиковый сосуд с внутренним диаметром 0,36 м и высотой 12 см, заполненный порошком толщиной слоя 9 см и вращающийся на оси, которая приводится в движение электродвигателем. Частота оборотов используемого двигателя зависит от подаваемого на него напряжения.

Датчик термоанемометра был неподвижно закреплен на рабочем столе, и вращающийся порошок набегал на него. Нить датчика располагалась на высоте 5 см от дна (примерно в середине слоя порошка) перпендикулярно набегающему потоку и дну. Датчик мог перемещаться поперек потока по радиусу цилиндра. Основные тарировки датчика термоанемометра были проведены на расстоянии $R = 135$ мм от оси вращения. В этом месте скорость набегающего на модель потока в основных экспериментах варьировала от 0,04 до 0,3 м/с.

В экспериментах использовался термоанемометр постоянного сопротивления 55D01 фирмы DISA (Дания) с одноточечным датчиком из вольфрамовой нити диаметром

* Работа выполнена при поддержке гранта Рособразования РНП.2.1.2/541.

6 мкм и длиной 1,5 мм. Постоянная времени датчика соответствовала 10^{-5} с. Величина перегрева нити датчика a_w изменялась от 0 до 1 (основные измерения проводились при $a_w = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ и 1).

Пульсационное и среднее напряжения на нити датчика термоанемометра записывались в ПК с помощью амплитудно-цифрового шестнадцатитбитного преобразователя E14-440 (максимальная частота 400 кГц, 16 каналов) с цифровым сигнальным процессором ADSP-2185M (тактовая частота работы 48 МГц). Полоса пропускания составляла 0,05 Гц.

В качестве рабочей среды использовались нанопорошки аморфного гидрофильного диоксида кремния (SiO_2). Основные эксперименты проведены в потоке порошка HDK N20 (фирмы «Wacker Chemie AG», Германия). Wacker HDK N20 – нанопорошок со средним размером исходных частиц 14 нм, удельной поверхностью 200 $\text{м}^2/\text{г}$ и насыпной плотностью 31 г/л.

Для получения тарировочных зависимостей среднего напряжения датчика термоанемометра от плотности нанопорошка использовался ряд нанопорошков диоксида кремния таркосил, производимых нами на опытном производстве ИТПМ-ИЯФ в Новосибирске [6–7] – таркосилы Б2 (с насыпной плотностью 53 г/л), Т-20 (58 г/л), Б07 (90 г/л), Б01 (135 г/л) и Б05 (137 г/л). Тарировка производилась при двух перегревах $a_w = 0,8$ и 1.

Методика определения параметров потока с помощью термоанемометра и полученные результаты

1. Тарировочные зависимости

Равенство подводимой к датчику термоанемометра электрической энергии и отводимого в поток тепла для установившегося процесса выражается соотношением:

$$\frac{E^2}{R_w} = \pi l \lambda (T_w - T_0) \text{Nu}, \quad (1)$$

где E – среднее напряжение на датчике термоанемометра; R_w – сопротивление нагретого датчика; l – длина нити; λ – коэффициент теплопроводности; T_w и T_0 – температура

нагретого и холодного датчика; Nu – число Нуссельта (зависит от коэффициента перегрева $a_w = (R_w - R_0)/R_0$).

Соотношение (1) легко преобразуется в выражение (2):

$$\frac{E^2}{a_w(a_w + 1)} = \frac{R_0 \pi l \lambda}{\alpha} \text{Nu} = C \text{Nu}, \quad (2)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления вольфрама. Для нанопорошка диоксида кремния коэффициент пропорциональности C оказался равным 106.

Число Нуссельта для проволочного датчика можно представить в виде

$$\text{Nu} = \text{Nu}_0 (1 - ka_w),$$

где

$$\text{Nu}_0 = A + B (\text{Re}_d)^{0,5}. \quad (3)$$

В соответствии с вышеуказанным были проведены тарировки и построены соответствующие тарировочные зависимости.

На рис. 1 приведены тарировочные зависимости $E(u)$ датчика термоанемометра в нанопорошке при различных перегревах a_w . Видно, что тарировочные зависимости линейны для всех a_w , что говорит о справедливости формулы (3) для всех перегревов нити.

Чтобы оценить универсальность (при различных перегревах) тарировочной зависимости

$$\frac{E^2 - E_0^2}{a_w(a_w + 1)(1 - ka_w)}$$

от $u^{0,5}$, сначала нужно определить коэффициент k . В соответствии с [3–4] он находился (при $u = 0,3$ м/с) по наклону приведенной на рис. 2 экспериментальной зависимости как $k = \text{tg} \alpha$. Для нанопорошка диоксида кремния $k = 0,57$.

На рис. 3 для разных перегревов нити приведена зависимость величины

$$\frac{E^2 - E_0^2}{a_w(a_w + 1)(1 - ka_w)}$$

от $u^{0,5}$. Видна универсальность (при разных перегревах) этой зависимости. Это свидетельствует о том, что на вопрос о применимости термоанемометра для измерений в потоке нанопорошка дается однозначно положительный ответ.

На рис. 4 приведена зависимость универсального (при всех перегревах) числа Нуссельта Nu_0 от величины $u^{0,5}$. Число Нуссельта в потоке нанопорошка диоксида кремния оказалось примерно в 40 раз больше, чем число Нуссельта в потоке воздуха.

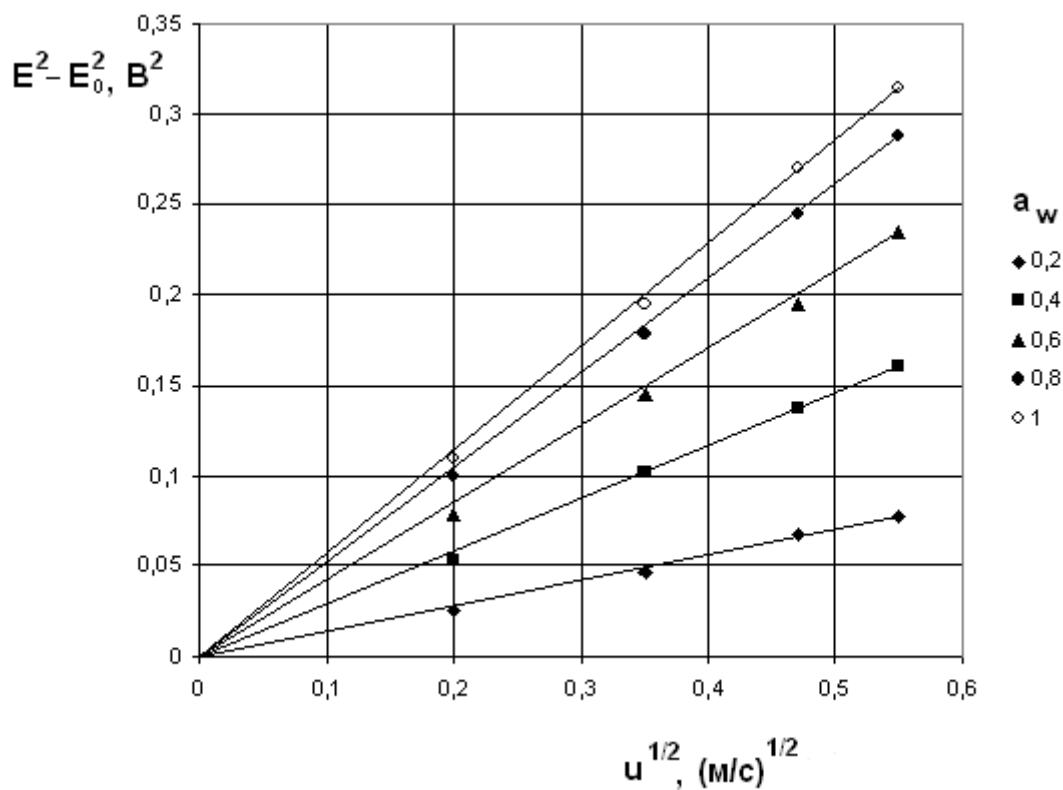


Рис. 1. Тарировочные зависимости $E(u)$ датчика термоанемометра в нанопорошке при различных перегревах a_w

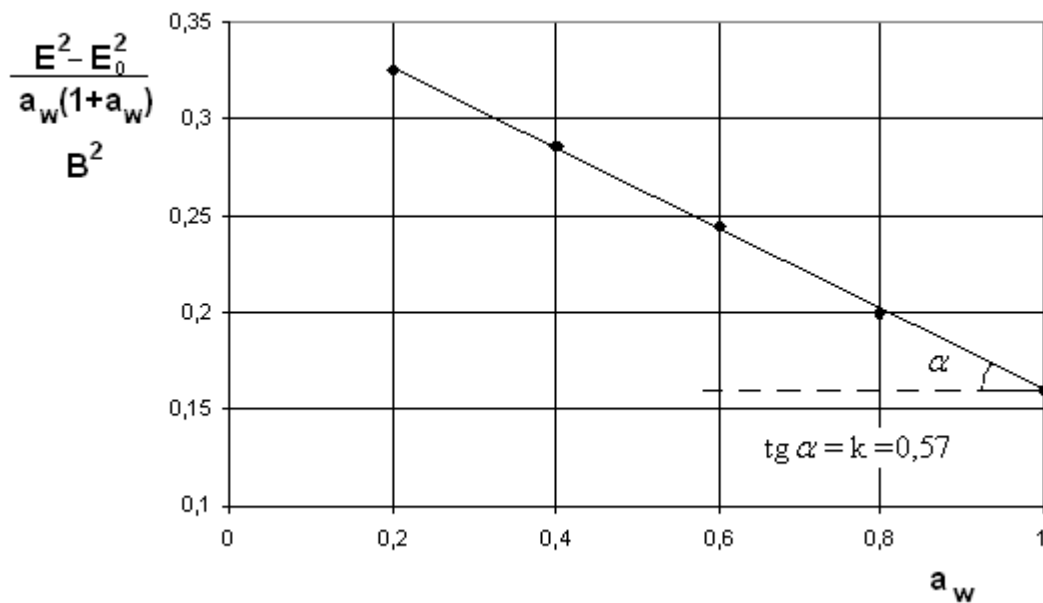


Рис. 2. Определение коэффициента k

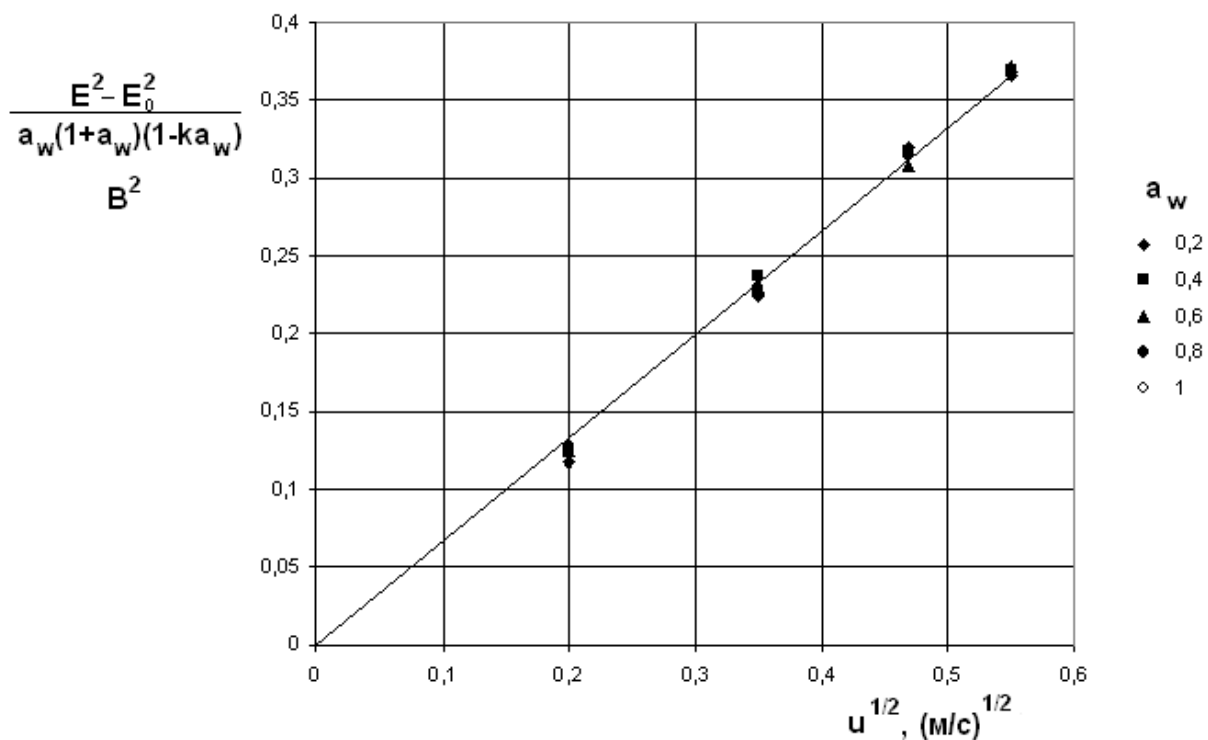


Рис. 3. Универсальная (при различных перегревах) тарировочная зависимость датчика термоанемометра в нанопорошке

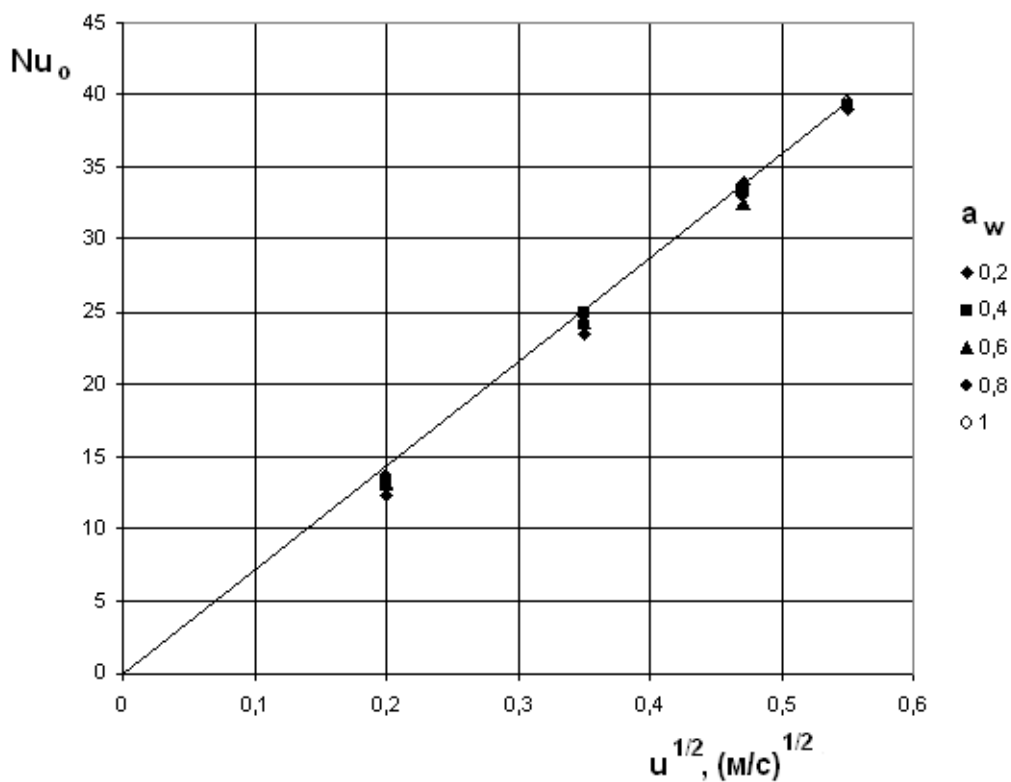


Рис. 4. Универсальная (при различных перегревах) зависимость числа Нуссельта Nu_0 от скорости потока

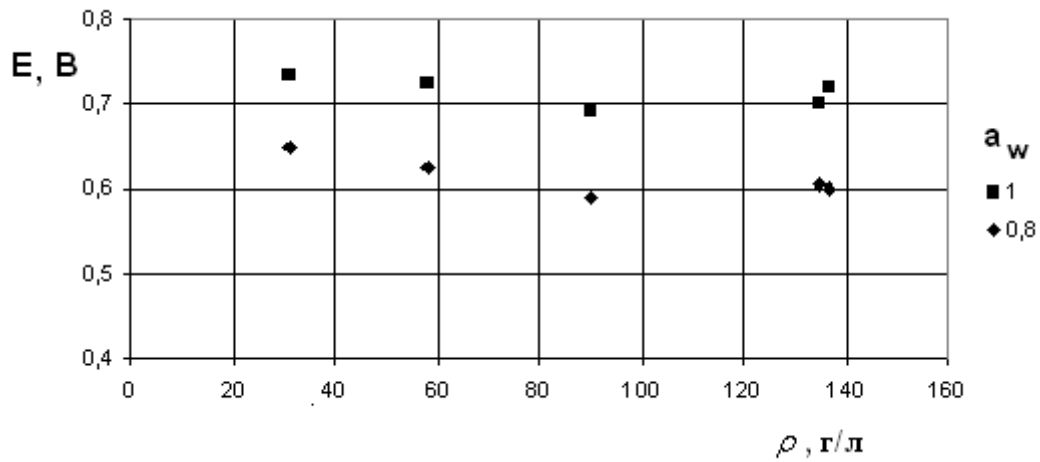


Рис. 5. Тарировочные зависимости среднего напряжения датчика термоанемометра от плотности нанопорошка при двух перегревах

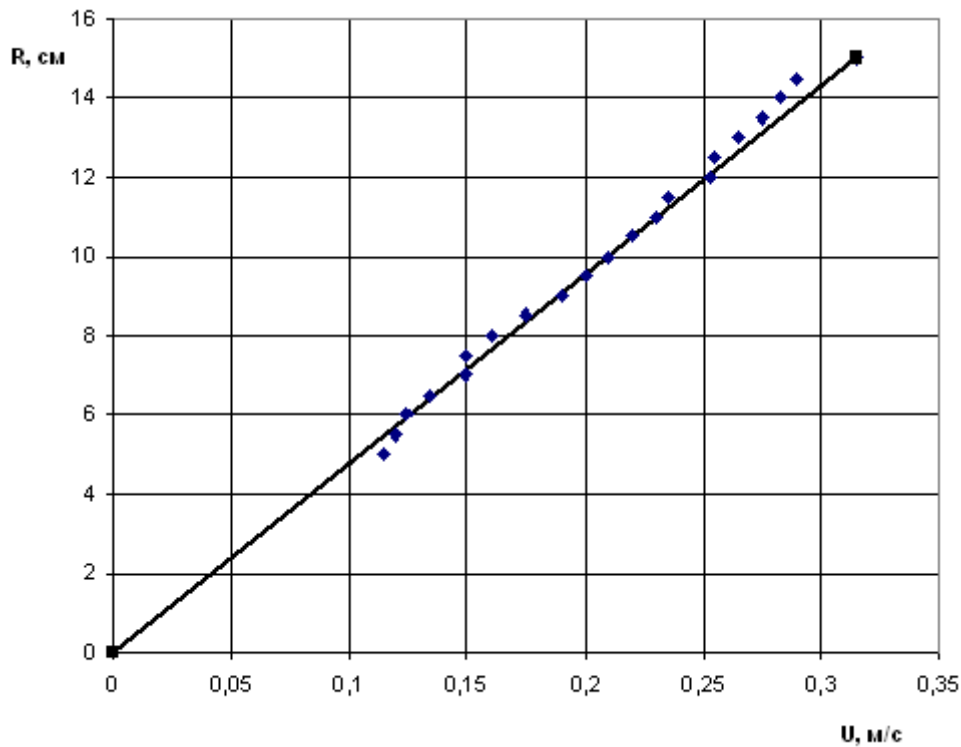


Рис. 6. Сравнение определенной с помощью термоанемометра (экспериментальные точки) распределения скорости потока во вращающемся цилиндре с истинным распределением скорости (сплошная линия)

2. Измерения пульсаций в потоке нанопорошка

При существенной дозвуковой скорости потока и постоянной (комнатной) темпера-

туре нанопорошка термоанемометр (кроме средних величин) фиксирует пульсации удельного массового расхода ρu . Связь между пульсациями напряжения e' на датчике термоанемометра и пульсациями скорости u'

и плотности ρ' выражается следующей зависимостью:

$$\frac{e'}{E} = Q \frac{u'}{U_\infty} + G \frac{\rho'}{\rho_\infty},$$

где коэффициенты

$$Q = \frac{\partial E}{\partial u} \cdot \frac{U_\infty}{E}$$

и

$$G = \frac{\partial E}{\partial \rho} \cdot \frac{\rho_\infty}{E}.$$

Величина Q определяется из данных на рис. 1, а для определения коэффициента G была проведена тарировка датчика термоанемометра в зависимости от плотности нанопорошка. На рис. 5 представлены тарировочные зависимости среднего напряжения датчика термоанемометра от плотности нанопорошка при двух перегревах (0,8 и 1). Было получено незначительное влияние плотности на среднее напряжение E . Поэтому оказалось $G \ll Q$ ($G/Q \sim 0,02$). И, как следствие этого, можно считать, что

$$\frac{e'}{E} \approx Q \frac{u'}{U_\infty}.$$

А это означает, что термоанемометром в потоке нанопорошка фиксируются преимущественно пульсации скорости потока.

3. Контрольная проверка применимости термоанемометра в потоке нанопорошка

Как уже отмечалось в описании методики эксперимента, тарировки датчика термоанемометра были проведены на расстоянии $R = 13,5$ см от оси вращения установки при разной скорости набегающего потока. После этого были замерены распределения среднего напряжения датчика термоанемометра вдоль радиуса установки в широком диапазоне расстояний $R = 5-15$ см, по полученным при $R = 13,5$ см тарировочным зависимостям определено распределение средней скорости и сравнено с истинным распределением скорости (определенным по угловой скорости вращения установки и значению R). Такое сравнение приводится на рис. 6 (сплошная линия соответствует истинной скорости). Видно хорошее соответствие определенных с помощью термоанемометра значений средней скорости с истинными, что еще раз свидетельствует о возможности

термоанемометрических измерений в потоке нанопорошка.

Заключение

Подробно исследованы характеристики датчика термоанемометра в потоке нанопорошка диоксида кремния. Определены универсальные (при различных перегревах) тарировочные зависимости напряжения термоанемометра и числа Нуссельта от средней скорости потока нанопорошка. Показано, что термоанемометром в потоке нанопорошка фиксируются преимущественно пульсации скорости потока.

Список литературы

1. Обанин В. В., Труфанов Д. Ю., Номоев А. В., Бардаханов С. П. Термоанемометрические измерения в нанопорошковых средах // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2008. Т. 8, вып. 1. С. 23–28.
2. Бардаханов С. П., Лысенко В. И., Труфанов Д. Ю. Применение термоанемометра для измерений скорости течения нанопорошков // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 1. С. 62–69.
3. Лебига В. А. Экспериментальное исследование характеристик турбулентных течений при сверхзвуковых скоростях: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1977. 207с.
4. Зиновьев В. Н., Косинов А. Д., Лебига В. А., Маслов А. А. Влияние притупления передней кромки модели на характеристики ламинарного пограничного слоя. Новосибирск, 1986. 31 с. (Препринт / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теоретической и прикладной механики, № 29-86).
5. Коважньий Л. С. Г. Измерение характеристик турбулентности // Физические измерения в газовой динамике и при горении. М.: ИЛ, 1957. С. 183–244.
6. Бардаханов С. П., Володин В. А., Ефремов М. Д., Черепков В. В., Фадеев С. Н., Корчагин А. И., Марин Д. В., Голковский М. Г., Танащев Ю. Ю., Лысенко В. И., Номоев А. В., Буянтуев М. Д., Сангаа Д. Синтез нанопорошков кремния // Нанотехнологии и наноматериалы. Улан-Удэ, 2007. С. 11–21.
7. Bardakhanov S. P., Volodin V. A., Efremov M. D., Cherepkov V. V., Fadeev S. N., Korchagin A. I., Marin D. V., Golkovskiy M. G., Tanashev Yu. Yu., Lysenko V. I., Nomojev A. V.,

Buyantuev M. D., Sangaa D. High Volume Synthesis of Silicon Nanopowder by Electron Beam Ablation of Si Ingot at Atmospheric

Pressure // Japan. J. Appl. Physics. 2008. Vol. 47. No. 9. P. 7019–7022.

Материал поступил в редколлегию 21.07.2011

V. I. Lysenko, D. Yu. Trufanov, S. P. Bardakhanov

**ABOUT HOT-WIRE ANEMOMETER APPLICABILITY
FOR MEASUREMENTS IN NANOPOWDER FLOW**

The paper is devoted to the detailed study of the hot-wire anemometer probe characteristic in the flow of silica nanopowder. The universal calibration graphs of hot-wire voltage and Nusselt number on the mean flow speed were determined. It was shown, that the hot-wire measures the speed fluctuations in nanopowder flow generally.

Keywords: nanopowders, hot-wire anemometer, calibration graph, mean flow, fluctuations