

УДК 53.082.6

**В.А.Карачинов, И.Г.Джеренов****МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРА  
НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ***Институт электронных и информационных систем НовГУ*

New heat-loss anemometer on the basis of silicon carbide is developed. The model of calculation of the heat-loss anemometer output characteristic is offered. The family of dependences schedules of a power failure on heat-loss anemometer versus speed of a stream is constructed.

**Введение**

Термоанемометрический метод, основанный на зависимости электрического сопротивления термочувствительного элемента (зонда) от скорости потока жидкости или газа, в настоящее время достаточно широко представлен в технике и различных технологиях [1-3]. Основным недостатком термоанемометров, зонды которых изготовлены из традиционных материалов (платина, вольфрам, никель), является сильная инерционность показаний прибора, низкая надежность и изменение его характеристик, в том числе вследствие образования углеводородных соединений на поверхности термочувствительного элемента [4]. Определенную перспективу для создания высокостабильных термоанемометрических зондов

представляет карбид кремния (SiC), который имеет известный ряд преимуществ перед металлами (низкая инерционность, значительная механическая прочность, высокая температура испарения и др.). В то же время трудности прецизионной размерной обработки, высокая стоимость исходного материала, проблемы, связанные с созданием стабильных высокотемпературных контактов, требуют проведения дополнительных исследований. Необходимым этапом таких исследований является компьютерное моделирование выходной (функциональной) характеристики SiC-термоанемометрического зонда.

**Методика исследования**

Конструкция термоанемометрического зонда состоит из чувствительного элемента в виде псевдо-

нитевидного SiC-терморезистора (1) и каркаса (2) из особо твердой латуни (рис.1). Тепловая модель представлена на рис.2.

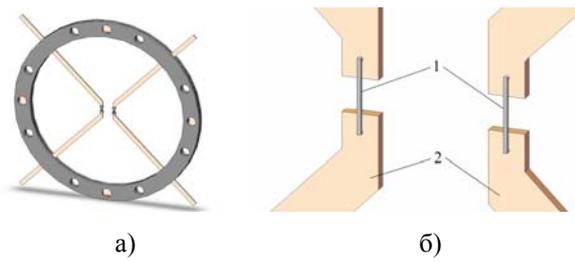


Рис.1. Конструкция термоанемометрического зонда: а) общая конструкция; б) конструкция чувствительного элемента. 1 — SiC-терморезистор; 2 — каркас

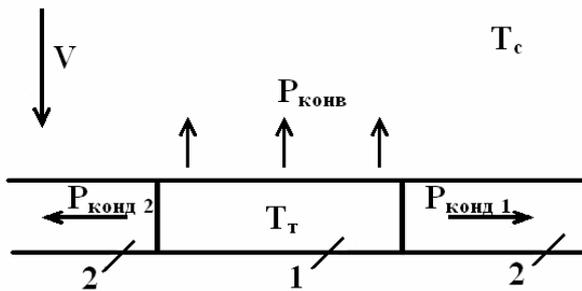


Рис.2. Тепловая модель. 1 — SiC-терморезистор; 2 — каркас

Мощность  $P_p$ , выделяемая терморезистором при пропускании через него тока подогрева  $I_{II}$ , будет расходоваться на конвекцию  $P_{конв}$ , кондукцию  $P_{конд}$  и излучение. Вследствие малого значения излучения им можно пренебречь. Таким образом, можно записать уравнение теплового баланса в следующем виде:

$$P_p = P_{конв} + P_{конд} \quad (1)$$

Связь между количеством тепла, переданного при свободном движении жидкости, и условиями теплообмена устанавливается формулой Ньютона [5,6]

$$P_{конв} = \alpha \cdot (T_T - T_C) \cdot S_{пов}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/мм<sup>2</sup>·К;  $S_{пов}$  — площадь поверхности теплообмена, мм<sup>2</sup>;  $T_T$  — температура поверхности твердого тела, К;  $T_C$  — температура жидкой среды, К. Согласно литературе [5,6] коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha$  можно представить в виде

$$\alpha = C \cdot \frac{\lambda_f \cdot Pr_f^{0,35}}{d^{1-m}} \cdot \left(\frac{V}{\nu_f}\right)^m, \quad (3)$$

где  $\lambda_f$  — коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/мм<sup>2</sup>·К;  $V$  — скорость потока, м/с;  $\nu_f$  — коэффициент кинематической вязкости жидкости, мм<sup>2</sup>/с;  $d$  — определяющий размер, мм. Значения  $C$  и  $m$  зависят от формы обтекаемого стержня и от диапазона чисел  $Re$  [5,6].

Часть каркаса, к которой крепиться терморезистор, для упрощения расчетов можно считать балкой конечной длины. Тогда мощность, отводимая кондукцией, может быть записана следующим образом [6]:

$$P_{конд} = 2 \cdot \lambda_K \cdot \Pi \cdot \omega \cdot (T_T - T_C) \cdot \frac{sh(\omega \cdot L)}{ch(\omega \cdot L)}, \quad (4)$$

где  $\lambda_K$  — коэффициент теплопроводности каркаса, Вт/мм<sup>2</sup>·К;  $\Pi$  — периметр сечения каркаса, мм;  $T_T$  — температура терморезистора, К;  $T_C$  — температура жидкой среды, К;  $L$  — длина каркаса, мм; а параметр  $\omega$  определяется формулой

$$\omega = \sqrt{\frac{\alpha_K \cdot \Pi}{\lambda_K \cdot S_{сеч}}}, \quad (5)$$

в которой  $\alpha_K$  — коэффициент теплоотдачи каркаса конвекцией, Вт/мм<sup>2</sup>·К;  $S_{сеч}$  — площадь сечения каркаса, мм<sup>2</sup>.

Из уравнений (1) – (5) окончательно получим уравнение зависимости падения напряжения на терморезисторе от скорости набегающего потока:

$$U = \left[ C \cdot \frac{\lambda_f \cdot Pr_f^{0,35}}{d^{1-m}} \cdot \left(\frac{V}{\nu_f}\right)^m \cdot (T_T - T_C) \cdot S_{пов} + 2 \cdot \lambda_K \cdot \Pi \cdot \omega \cdot (T_T - T_C) \cdot \frac{sh(\omega \cdot L)}{ch(\omega \cdot L)} \right] \cdot R_T, \quad (6)$$

где  $R_T$  — сопротивление терморезистора, Ом.

### Результаты расчетов

Расчеты выполнены в программе MathCAD 14.

Терморезистор выполнен из карбида кремния 6H-SiC [7] и имеет следующие габаритные размеры: длина  $l = 2$  мм, сечение  $a = b = 0,1$  мм. Каркас выполнен из особо твердой латуни Л63 [8], длина штанги  $L = 30$  мм, ширина  $a = 1$  мм, толщина  $b = 0,3$  мм.

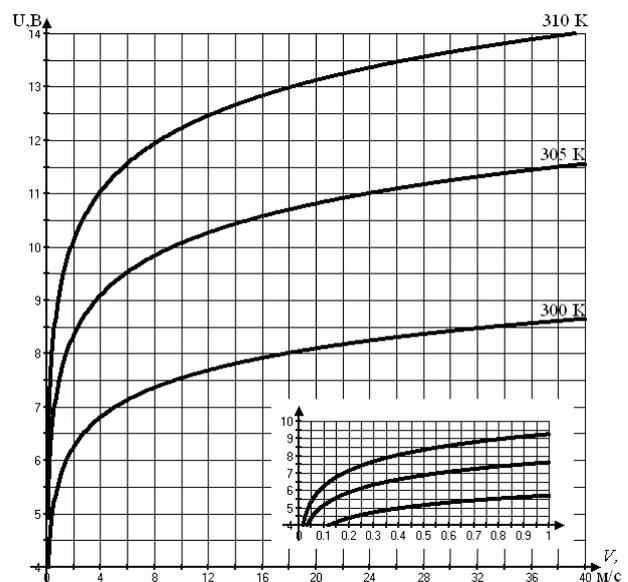


Рис.3. График зависимости падения напряжения на терморезисторе от скорости набегающего потока

Параметры окружающей среды:  $T_c = 293$  К,  $\lambda_f = 2,6 \cdot 10^{-4}$  Вт/мм<sup>2</sup>·К,  $\nu_f = 15$  мм<sup>2</sup>/с. Характеристики карбида кремния: подвижность носителей заряда  $\mu_n = 30000 - 35000$  мм<sup>2</sup>/В·с, концентрация носителей заряда  $n = 10^{-14}$  мм<sup>-3</sup>, удельная теплоемкость  $c = 0,75$  Дж/г·К, плотность  $\gamma = 0,0032$  г/мм<sup>3</sup>,  $\lambda_m = 0,2 - 0,4$  Вт/мм·К [7].

Расчеты были проведены для температур перегрева терморезистора  $T_c = 300, 305$  и  $310$  К и для скоростей набегающего потока  $V = 0,1 - 40$  м/с.

В результате расчетов была получена выходная характеристика (рис.3), из которой видно, что даже при малой температуре перегрева 300-310 К термоанемометр имеет достаточно высокую чувствительность как в области высоких скоростей потока  $V = 1 - 40$  м/с, так и в области низких скоростей  $V = 0,1 - 1$  м/с. Кроме того понятно, что при увеличении температуры перегрева можно увеличить чувствительность термоанемометра, но при этом может увеличиться погрешность, связанная с усилением теплового шума.

## Заключение

Итак, по результатам работы предложен новый термоанемометр на основе псевдонитевидного терморезистора из карбида кремния; получена методика расчета выходной характеристики термоанемометра; получены кривые зависимости падения напряжения от скорости потока; определен диапазон измеряемых скоростей.

1. Байцар Р.И., Варшава С.С., Потапчук Г.Н., Чекурин В.Ф., // Приборы и техника эксперимента. 1994. №3. С.158-163.
2. Карачинов В.А., Туркин А.В. // Вестник НовГУ. Сер.: Ест. и техн. науки. 1997. №5. С.6-8.
3. Ураксеев М.А., Романченко А.Ф., Абдрашитова Д.Р., Шилов С.А. // Исследовано в России. 2006. С.587-593, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/051.pdf>
4. Расчет и конструирование расходомеров / Под ред. П.П.Кремлевского. Л.: Машиностроение, 1978. 224 с., ил.
5. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Справочник / Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
6. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
7. Карбид кремния / Под ред. Г.Хениш и Р.Роя. М.: Мир, 1972. 386 с.
8. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. 8-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И.Н.Жестковой. М.: Машиностроение, 2001. Т.1. С.214-219.