

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НАГРЕВАНИЯ  
ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ**

Абрамова А.В., Бычкова А.А.

Научный руководитель: Атрошенко Ю.К, ассистент  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: ava35@tpu.ru

**NUMERICAL RESEARCH OF INFLUENCE OF DURATION OF HEATING  
OF THERMOCONVERTERS OF RESISTANCE ON THE MEASUREMENT ERROR**

Abramova AV, Bychkova AA

Scientific Supervisor: Assistant prof. ATP ENIN Atroshenko Yu.K.  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: ava35@tpu.ru

*Abstract: The numerical study of the integral characteristics of heat transfer process in three types RTD at measurement high temperatures was done. As a result of numerical study the heat transfer model in the sensing element of RTD was developed. These have been shown that measurement error depends inversely and nonlinearly from heating duration of RTD. The theoretical dependences of relative error of RTD from time required for heating sensitive element were determined.*

Температура – физическая величина, характеризующая термодинамическую систему и количественно выражающая понятие о различной степени нагретости тел, один из важнейших контролируемых параметров технологических процессов во многих отраслях промышленности [1-4]. При измерении температуры важной задачей является обеспечение точности измерения. Погрешность измерения определяется большим количеством факторов, в том числе продолжительностью проведения измерений [1,2].

Необходимую продолжительность выполнения измерения в пределах допустимой погрешности возможно определить для каждого типа термопреобразователя с помощью прогностической модели. Так, одним из методов оценки погрешности является численное моделирование чувствительного элемента термопреобразователя [1,2].

Целью настоящего исследования является определение влияния длительности нагревания чувствительного элемента на погрешность измерений для различных типов ТПС.

При построении модели рассматривается задача теплопроводности для области, представляющей неоднородную систему, включающую чувствительный элемент термопреобразователя сопротивления (ТПС), защитный чехол (металлическая оболочка) и область между ними, заполняемую порошком оксида алюминия  $Al_2O_3$  (рис.1).

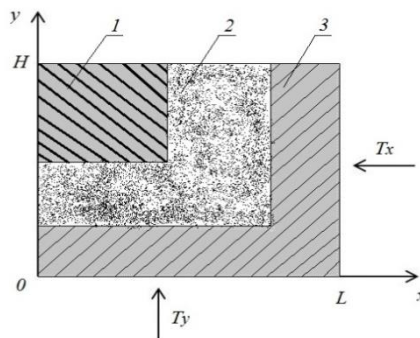


Рис. 1. Схема области решения задачи: 1 – чувствительный элемент; 2 – изоляционный порошок ( $Al_2O_3$ ); 3 – металлическая оболочка (сталь);  $H$  – высота участка чувствительного элемента ТПС по оси  $Y$ ,  $L$  – радиус чувствительного элемента ТПС по оси  $X$

Нестационарный процесс переноса тепла в чувствительном элементе ТПС описывается системой дифференциальных уравнений [2]:

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right), 0 < r < r_1, z_2 < z < H; \quad (1)$$

$$c_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), 0 < r < r_2, z_1 < z < z_2; r_1 < r < r_2, z_2 < z < H; \quad (2)$$

$$c_3 \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right), 0 < r < r_3, 0 < z < z_1; r_2 < r < r_3, z_1 < z < H; \quad (3)$$

где  $\rho_i$  – плотность материала,  $c_i$  – удельная теплоемкость материала,  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности материала.

Математическая модель включает следующие граничные условия:

Граница «Чувствительный элемент – порошок  $Al_2O_3$ » ( $r=r_1, z=z_2$ ),  $T_1(r_1, z) = T_2(r_1, z)$ ,  $T_1(r, z_2) = T_2(r, z_2)$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1}; (z_2 < z < H);$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=z_2} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=z_2}; (0 < r < r_1);$$

Граница «порошок  $Al_2O_3$  – защитный чехол» ( $r=r_2, z=z_1$ ),  $T_2(r_2, z) = T_3(r_2, z)$ ,  $T_2(r, z_1) = T_3(r, z_1)$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=r_2}; (z_1 < z < H);$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=z_1} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big|_{z=z_1}; (0 < r < r_2).$$

Для решения дифференциальных уравнений в частных производных используется метод конечных разностей на основе четырехточечной неявной разностной схемы. Область решения задачи разбита на равномерную конечно-разностную сетку  $200 \times 200$  узлов с шагом по координатам:  $h = 2,5 \cdot 10^{-2}$  мм, шаг по времени  $t = 0,001$  с [5].

При решении задачи теплопроводности приняты следующие теплофизические характеристики элементов области (рис. 1). Элемент № 1: платина ( $\lambda_1 = 70$  Вт/(м·К);  $c_1 = 134$  Дж/(кг·К);  $\rho_1 = 21500$  кг/м<sup>3</sup>); медь ( $\lambda_1 = 390$  Вт/(м·К);  $c_1 = 385$  Дж/(кг·К);  $\rho_1 = 8890$  кг/м<sup>3</sup>); никель ( $\lambda_1 = 92$  Вт/(м·К);  $c_1 = 500$  Дж/(кг·К);  $\rho_1 = 8900$  кг/м<sup>3</sup>). Элемент № 2: порошок  $Al_2O_3$  ( $\lambda_2 = 6,57$  Вт/(м·К);  $c_2 = 850$  Дж/(кг·К);  $\rho_2 = 1520$  кг/м<sup>3</sup>). Элемент № 3: сталь ( $\lambda_3 = 47$  Вт/(м·К);  $c_3 = 460$  Дж/(кг·К);  $\rho_3 = 7800$  кг/м<sup>3</sup>) [6,7].

Искомые зависимости, полученные для режимов работы ТПС, в которых температура измеряемой среды составляет 350 К, 550 К, 750 К, для ТПС типов ТСП (платиновый ЧЭ), ТСМ (медный ЧЭ), ТСН (никелевые ЧЭ) приведены на рис. 2.

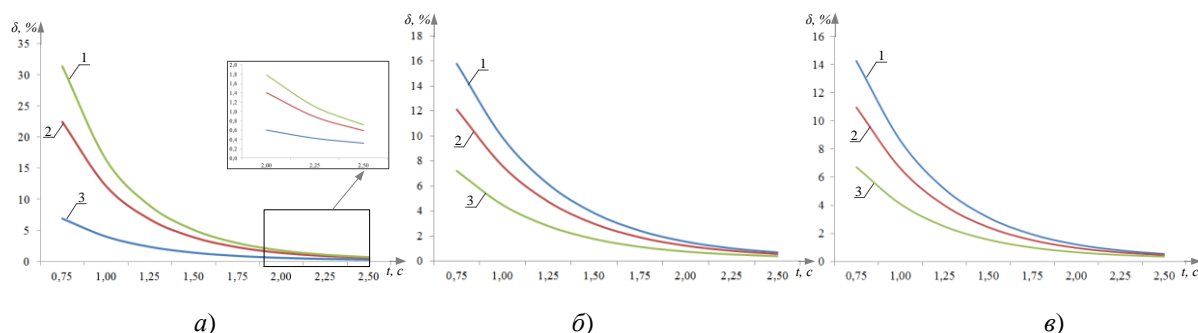


Рис. 2. Зависимости погрешности измерений от времени нагрева чувствительного элемента: а – платиновый ТПС; б – медный ТПС; в – никелевый ТПС

Из рис. 2 видно, что наибольшая погрешность измерения при равном времени нагрева получена для платиновых термопреобразователей, наименьшая – для медных термопреобразователей. При этом, погрешность измерения с помощью платиновых ТПС превышает погрешности измерения медными и никелевыми ТПС, в среднем, в 1,3–1,7 раза. Такое соотношение объясняется различиями теплофизических характеристик материалов. Из рис. 2 следует, что погрешность измерения температуры с помощью ТПС может быть снижена путем увеличения длительности нагрева.

При выполнении численного исследования разработана модель теплопереноса в чувствительном элементе термопреобразователя сопротивления. Показано, что погрешность измерения находится в обратной нелинейной зависимости от длительности нагрева ТПС. Определены теоретические зависимости относительной погрешности ТПС от времени нагрева чувствительного элемента. Определено, что для получения удовлетворительной погрешности для платиновых ТПС требуется большее время нагрева чувствительного элемента (в среднем, в 1,5–1,7 раза). Разработанная модель может быть использована при планировании экспериментов, связанных с измерением температуры, а также в промышленных измерениях.

Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» №13.1339.2014/К (шифр федеральной целевой научно-технической программы 2.1410.2014).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Атрошенко Ю.К., Озерова И.П., Стрижак П.А. Влияние теплового контакта на результаты измерений поверхностных термоэлектрических преобразователей. – Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 1 (214), 2015. – С. 97–105;
2. Yu.K. Atroshenko, P.A. Strizhak, O.S. Yashutina Determination on necessary time of measurements of surface thermocouples depending on conditions of technological processes. – EPJ Web of Conferences 82, 01061 (2015);
3. Min-ling Zhu A thermometer based on diverse types thermocouples and resistance temperature detectors. – J Shanghai Jiaotong University (Science), vol. 20, Is. 1, 2015. – pp.93–100;
4. Panhui Chen; Lifeng Guo; Gubing Lu; Chuanxi Jin A Precision Resistance Generator for the Calibration of RTD-based Temperature Instruments. Applied Mechanics & Materials, vol. 721, pp. 513–516;
5. A.A. Samarskii, The Theory of Difference Schemes, Marcel Dekker Inc., USA, 2001;
6. N.B. Vargaftik, Reference Book on Thermophysical Properties of Gases and Liquids, Stars, Moscow [in Russian], 2006.
7. R. Hultgren Selected Values of the Thermodynamic Properties of Binary Alloys, USA, American Society for Metals, 1973.