

## ВЛИЯНИЕ НЕПЛОТНОСТИ КОНТАКТА ТЕРМОПАРЫ И МАТЕРИАЛА НА ПОГРЕШНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

КУЗНЕЦОВ Г.В., МУХАММАДЕЕВ К.М.

Томский политехнический университет, г.Томск

[izvestiya@ktu.aknet.kg](mailto:izvestiya@ktu.aknet.kg)

*Приведены результаты численного моделирования температурных полей в спае термопары при идеальном и неидеальном контакте спая термопары с материалом. Проведено сравнение погрешностей температурных измерений в условиях заполнения зазора воздухом и клеевым составом. Рассмотрены влияние нестационарных условий нагрева на точность определения температуры материала термопарой при неидеальном контакте спая термопары с поверхностью материала.*

Контроль температуры в твердых телах, как правило, проводят с использованием термопар [1]. При температурных измерениях достаточно сложно добиться полного контакта спая термопары с поверхностью материала, температуру которого измеряют [2, 3]. За счет неидеальности контакта спая термопары и поверхности материала возможно появление ошибок при контроле температуры. Представляет интерес оценка ошибок в измерениях температур, связанных с отсутствием контакта между спаем и термопарой на части поверхности спая. Аналогичная задача возникает, и если зазоры, возникающие при креплении термопары в материале, заполняются каким-либо веществом (например, клеевым составом) с существенно отличными по сравнению с материалом, в котором устанавливаются термопары, теплофизическими характеристиками.

Рассматриваемая задача имеет большое практическое значение, т.к. ее решение позволяет выработать рекомендации по длительности измерений, обеспечивающих минимальные погрешности, а также по достоверности получаемых результатов при исследовании быстропотекающих процесс-сов.

Рассматривается задача теплопроводности для прямоугольной по внешнему контуру области, представляющей собой неоднородную среду, включающую полость малых размеров, заполненную воздухом или клеевым составом, внутри которой расположен спай термопары. В результате образуется переменный по периметру спая зазор, толщина которого зависит от конфигураций полости и спая термопары.

В ходе исследования ошибка, вносимая неидеальностью контакта спая термопары, определялась как разность температуры на поверхности термопары при идеальном  $T_c^e$  и неидеальном  $T_c^c$  контактах с материалом, в котором проводятся измерения.

Относительная погрешность температурных измерений определялась по формуле:

$$\delta T = \frac{T_c^e - T_c^c}{T_c^e} \cdot 100\%, \text{ где } T_c^e \text{ и } T_c^c - \text{ температура спая термопары при идеальном и неидеальном}$$

контакте соответственно.

На рис. 1 изображена геометрическая модель области решения при идеальном и неидеальном контакте спая термопары и образца материала. Спай термопары образован спаем двух электродов и в рассматриваемой задаче имеет прямоугольный профиль. Электроды термопары структурно однородны, но выполнены из материалов с различными теплофизическими свойствами: материал положительного термоэлектрода – алюминий, отрицательного – хромель. Термопара зачеканена образец материала, выполненный из стали 20. Теплофизические свойства спая термопары соответствуют средним арифметическим значениям соответствующих теплофизических свойств ее термоэлектродов.

Нестационарный процесс переноса тепла теплопроводностью описывается уравнением, записанным в декартовой системе координат для двумерной задачи:

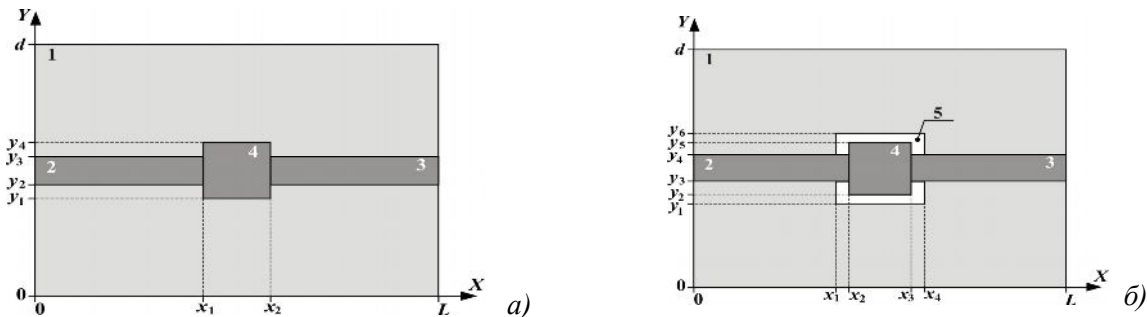
$$c\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right),$$

$t > 0, 0 < x < L, 0 < y < d$ , где  $\rho$  – плотность,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $L$  – ширина области решения,  $d$  – толщина области решения.

Математическая модель включает начальное условие:  $t = 0; T = T_0$  и граничные условия равенство нулю градиентов температуры на всех границах за исключением границы  $y = d$ :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ при } x = 0, x = L; \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \text{ при } y = 0.$$

На границе  $y = d$  задаются граничные условия третьего рода:  $\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \cdot (T_v - T|_{y=d})$



**Рис. 1. Геометрическая модель области решения при идеальном (а) и неидеальном (б) контакте спая термопары и материала 1 – образец материала; 2 – алюминель; 3 – хромель; 4 – спай термопары; 5 – воздушный зазор;  $d$  – толщина области решения;  $L$  – ширина области решения.**

При решении дифференциального уравнения в частных производных использовался метод конечных разностей (МКР) [4]. Разностные аналоги исходных дифференциальных уравнений в частных производных решены локально-одномерным методом. Для решения одномерных разностных уравнений использовалась неявная итерационная четырехточечная разностная схема. В ходе решения применялась неравномерная разностная сетка со сгущением в зоне непосредственных термопарных измерений.

Численный анализ температурных полей проводился при теплофизических характеристиках, приведенных в таблице.

При численном моделировании приняты значения геометрических параметров: толщина  $d = 10$  мм; ширина  $L = 40$  мм, размеры спая термопары  $1 \times 1$  мм, толщина термоэлектродов 0,5 мм.

**Таблица**

**Теплофизические характеристики материалов [5 - 7]:**

№ элемента	Материал	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость $c$ , Дж/(кг·К)	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Сталь 20	40,00	430	7800
2	Алюмель	32,70	942	8625
3	Хромель	16,00	451	8750
4	Спай термопары	24,35	696	8688
5 (а)	Воздух	0,02	1005	1,205
5 (б)	Клей	5,00	1000	2440

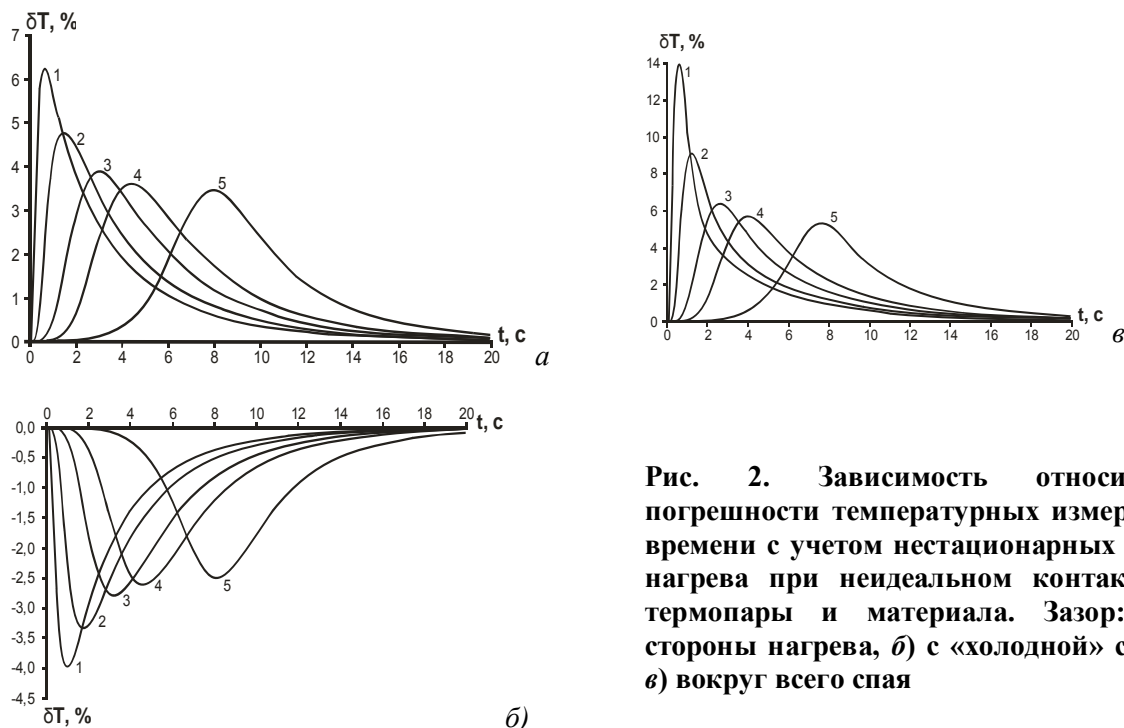
Возникновение неидеальности контакта спая термопары и материалом оказывает заметное влияние на отклонение температуры в центре спая термопары по сравнению со случаем идеального контакта в начальные моменты времени проведения измерений температуры. Зависимость относительной погрешности температурных измерений при неидеальности контакта носит нелинейный характер. Эта зависимость характеризуется ярко выраженным экстремальным значением. Наличие ярко выраженного экстремума ошибки температурных измерений вызвано, тем, что коэффициент теплопроводности вещества, заполняющего зазор при неидеальном контакте спая термопары и материала, значительно меньше коэффициента теплопроводности материала, температуру которого измеряют. С течением времени происходит прогрев вещества, заполняющего зазор, и ошибка, возникающая при измерении температуры, уменьшается, приближаясь к нулю. Замечено, что при закреплении термопары в пазу при помощи клея максимальная относительная ошибка, возникающая за счет неидеальности контакта, уменьшается до 2 раз по сравнению со случаем заполнения зазора воздухом, причем время достижения максимальной погрешности практически не зависит от вещества, заполняющего зазор.

В ходе математического моделирования определялось влияние коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  на поверхности материала на погрешность определения температуры при возникновении неидеального контакта. Установлено, что с ростом  $\alpha$  увеличивается погрешность температурных измерений. При высокой интенсивности нагрева образца материала за счет низкого коэффициента теплопроводности вещества, заполняющего зазор между спаем термопары и образцом материала (воздух или клей), не обеспечивается достаточная скорость прогрева спаю термопары, что приводит к увеличению погрешности определения температуры.

В ходе численного эксперимента также проведено исследование влияния нестационарности коэффициента теплоотдачи на границе поверхности образца материала на изменение относительной погрешности температурных измерений в случае неидеального контакта спаю термопары и материала (рис. 2). Рассматривались несколько видов зависимостей коэффициента теплоотдачи от времени (порядковые номера соответствуют нумерации кривых на рис.2):

- 1) коэффициент теплоотдачи неизменен во времени  $\alpha = 250 \hat{=} / (i^2 \cdot \hat{E}) = \text{const}$  ;
- 2) линейная зависимость  $\alpha = k_1 \cdot t, 0 \leq t < 10 \text{ c}; \alpha = 250 \hat{=} / (i^2 \cdot \hat{E}), t \geq 10 \text{ c}$ ;
- 3) квадратичная зависимость  $\alpha = k_2 \cdot t^2, 0 \leq t < 10 \text{ c}; \alpha = 250 \hat{=} / (i^2 \cdot \hat{E}), t \geq 10 \text{ c}$ ;
- 4) кубическая зависимость  $\alpha = k_3 \cdot t^3, 0 \leq t < 10 \text{ c}; \alpha = 250 \hat{=} / (i^2 \cdot \hat{E}), t \geq 10 \text{ c}$ ;
- 5) экспоненциальная зависимость  $\alpha = k_4 \cdot (\exp(t) - 1), 0 \leq t < 10 \text{ c}; \alpha = 250 \hat{=} / (i^2 \cdot \hat{E}), t \geq 10 \text{ c}$ .

Выявлено, что с увеличением показателя степени временной переменной в выражении определения коэффициента теплоотдачи, относительная погрешность температурных измерений, возникающая за счет неидеальности контакта спаю термопары и элемента конструкции, уменьшается, а время достижения максимального значения относительной погрешности увеличивается независимо от места возникновения неидеальности контакта.



**Рис. 2. Зависимость относительной погрешности температурных измерений от времени с учетом нестационарных условий нагрева при неидеальном контакте спаю термопары и материала. Зазор: а) со стороны нагрева, б) с «холодной» стороны, в) вокруг всего спаю**



## Литература

1. Мурин Г.А. Теплотехнические измерения. – М.: Энергия, 1979. 364 с.
2. Боровкова Т.В. Методика определения погрешности температуры с помощью термопар в элементах конструкции из неметаллических функционально неразрушаемых материалов: дис. канд. тех. наук: 05.07.07. – М., 2008, 181 с
3. Методические погрешности измерения термопарами температуры тонкостенной металлической конструкции/Под ред. А.Н. Баранов, В.В. Давыдова, Т.А. Попова и др. // Труды ЦАГИ, 2004. Вып. 2658. 80 с.
4. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высшая школа, 2002. 840 с.
5. Геращенко О.А., Федоров В.Г. Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство. – Киев: Наукова думка, 1965. 304 с.
6. Таблицы физических величин: Справочник /Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. 1005 с.
7. Справочник по электротехническим материалам/ Ред. Ю.В. Корицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 2. 464 с.