

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ОТЖИГА  
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КАБЕЛЬНЫХ ТЕРМОПАР**

**Яшутина О.С.**

*Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Иванова Е.В.  
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Температура является одним из важнейших параметров технологических процессов. Она обладает некоторыми принципиальными особенностями, что обуславливает необходимость применения большого количества технических средств и методов для ее измерения.

Различают контактные и бесконтактные методы измерения температуры.

Одним из самых распространенных методов измерения температуры, особенно в промышленности, является метод измерения с помощью термопары.

Термопара - это датчик температуры, состоящий из двух соединённых между собой разнородных электропроводящих элементов, обычно металлических проводников, реже полупроводников [1].

Использование кабельных термопар имеет ряд преимуществ перед обычными промышленными термопарами в жестком керамическом корпусе.

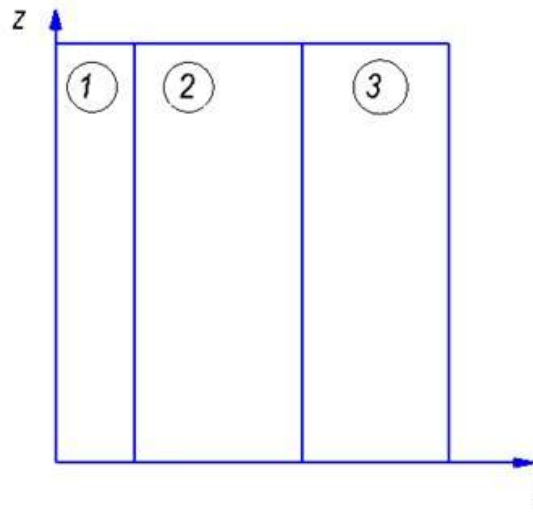
Конструкция кабельной термопары определяет ее основное преимущество: гибкость и герметичность корпуса. Также возможно изготовление кабельных термопар большой длины. И благодаря изоляции и тонкому корпусу такие термопары отличаются намного меньшей тепловой инерционностью в отличие от промышленных жестких термопар.

Кабельные термопары применяются практически во всех отраслях промышленности в очень широком диапазоне температур. В настоящее время есть ряд работ, посвященных моделированию тепловых процессов в промышленных жестких термопарах [2-5]. Несмотря на многолетние научные работы и большой опыт в производстве, технологические процессы изготовления кабельных термопар в полной мере не проработаны теоретически [6].

При постановке задачи предполагалось, что в процессе изготовления кабельную термопару пропускают через специализированную камеру, в которой происходит отжиг оболочки термопары.

Целью данной работы является определение конечного времени отжига, для процесса изготовления кабельных термопар, с помощью математического моделирования.

При моделировании рассматривалась система, представленная на рисунке 1.



*Рис. 1. Схема области решения задачи при  $0 \leq t \leq t_p$ ; 1 – спай термопары, 2 – изоляция, 3 – оболочка кабельной термопары*

Система нестационарных дифференциальных уравнений теплопереноса в частных производных для системы «спай термопары – изоляция – оболочка кабельной термопары» (рис.1), соответствующая сформулированной физической постановке задачи, имеет следующий вид [7-9].

Уравнение теплопроводности для спая термопары ( $0 < r < r_1$ ,  $0 < z < z_1$ ):

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right).$$

Уравнение энергии для изоляции ( $r_1 < r < r_2$ ,  $0 < z < z_1$ ):

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right).$$

Уравнение теплопроводности для оболочки кабельной термопары ( $r_2 < r < r_3$ ,  $0 < z < z_1$ ):

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right).$$

Здесь  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – теплоемкость, Дж/(кг\*К);  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м\*К);  $r$ ,  $z$  – координаты цилиндрической системы, м; индексы «1», «2», «3» соответствуют спая термопары, изоляции, оболочке.

Начальные условия:  $t_0 = 20$  °С;  $T_k = 300$  °С.

Результаты расчетов показаны на рисунке 2.

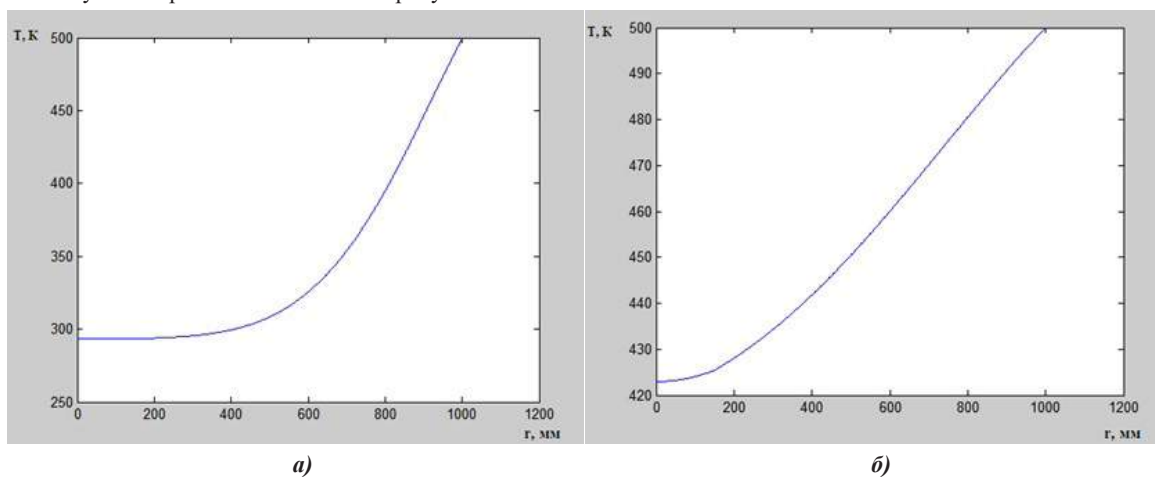


Рис. 2. Распределение температуры в чувствительном элементе через 10 с (а) и 40 с (б)

Из рисунка 2, а видно, что перепад температур на внешней оболочке и в центре термопары составляет около 205 К. Из рисунка 2, б видно, что перепад температур на внешней оболочке и в центре термопары составляет примерно 78 К.

По результатам работы можно сделать вывод, что при повышении конечной температуры происходит равномерный прогрев по всем слоям термопары. Это положительно влияет на качество готового изделия. Минимизировать конечную температуру прогрева нельзя, но чрезмерное повышение температуры нецелесообразно, так как это приведет к дополнительным затратам электроэнергии.

#### Литература

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. Atroshenko, Y.K., Strizhak, P.A., Yashutina, O.S. Determination of necessary time of measurements of surface thermocouples depending on conditions of technological processes. – Source of the Document EPJ Web of Conferences 82, 01061, 2015.
3. Atroshenko, Y.K., Strizhak, P.A. Numerical evaluation of the measurement error of temperature by surface thermocouples in the conditions of incomplete thermal contact with object of measurement. – EPJ Web of Conferences 76, 01034, 2014.
4. Атрошенко Ю.К., Стрижак П.А. О необходимых и достаточных временах измерений термоэлектрическими преобразователями с защитными гильзами // Датчики и системы. 2015. № 5 (192). С 23–27.
5. A. A. Ulanovskiy, E. S. Zemba1, A. M. Belenkiy, S. I. Chibizova, A. N. Bursin. Stability of Cable Thermocouples at the Upper Temperature Limit of their Working Range. – Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, Volume 8, 2013. – С. 576-580.
6. В.А. Каржавин, А.В. Каржавин. Пути повышения надежности и точности измерения температур с помощью термопар. – Приборы, № 12, 2010. - С. 12-22.
7. Джалурия, Й. Естественная конвекция: тепло– и массообмен / Джалурия Й. – М. : Мир, 1983. – 399 с.
8. Пасконов, В.М. Численное моделирование процессов тепло– и массообмена / Пасконов В.М. – М. : Наука, 1984. – 277 с.
9. Самарский, А.А. Теория разностных схем / Самарский А.А. – М.: Наука, 1983. – 616 с.