

# ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ТЭС

О.С. Яшутина

Томский политехнический университет  
yashutina1993@mail.ru

## Введение

Температура рабочих сред и технологического оборудования используется не только для оценки качества и экономичности работы объекта, но и служит одним из важнейших показателей надежности не только для объектов энергетики, но и в металлургии, нефтегазовой отрасли [1]. Это связано, прежде всего, с тем, что на объектах энергетики, металлургии и других промышленных предприятиях протекание технологических процессов характеризуется высокими температурами [2]. На производствах температура чаще всего измеряется контактными измерительными средствами – термопреобразователями сопротивления и термоэлектрическими преобразователями (ТЭП). Для измерения высоких температур (более 850 К), как правило, применяют термопарные датчики промышленного исполнения [3]. Измерение температуры термопарами, как и другими типами контактных датчиков, сопряжено с появлением дополнительных погрешностей, обусловленных неполнотой теплового контакта, отводом тепла по стенкам чувствительного элемента и другими факторами. При измерении же высоких температур интерес представляет исследование влияния радиационного теплообмена [4, 5] на интегральные показатели качества процесса измерения, в том числе необходимое время измерения и температурное поле в чувствительном элементе датчика в процессе измерения.

## Модель теплопереноса и методы решения

Область решения задачи теплопереноса показана на рис. 1.

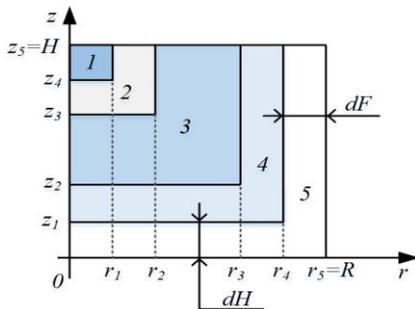


Рис. 1. Область решения задачи теплопереноса: 1 – спай термопары; 2 – керамический колпачок; 3 – порошок оксида алюминия; 4 – защитный чехол; 5 – воздушный зазор,  $dF$  – толщина кольцевого зазора,  $dH$  – толщина вертикального зазора

Математическая модель для области решения (рис. 1) описывается системой дифференциальных

уравнений, аналогично моделям приведенным в [2].

На внутренних границах раздела материалов области, показанной на рис. 1, приняты граничные условия IV рода [2].

Краевые условия задачи, область решения которой приведена на рисунке 1, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Краевые условия задачи

Краевые условия	Граница области решения	Краевые условия	Граница области решения
$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$	$z=H$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$r=0$
$-\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial z} = q$	$z=0$	$-\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} = q$	$r=R$

Где  $q$  – тепловой поток, действующий на чувствительный элемент датчика со стороны контролируемой среды или объекта измерения, Вт;  $r$  – радиальная координата, м;  $z$  – осевая координата, м;  $H$  – высота участка ТЭП, м;  $R$  – радиус чувствительного элемента, м;  $T$  – измеряемая температура, К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Величина  $q$  в условиях отсутствия конвективного теплообмена формируется двумя процессами – кондуктивным  $q_K$  и радиационным  $q_L$  теплопереносом [5]:

$$q = q_K + q_L.$$

Решение системы нестационарных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными и краевыми условиями выполнено методом конечных разностей. Одномерные разностные уравнения решены методом прогонки на основе неявной четырехточечной разностной схемы [6].

Область решения задачи разбита на равномерную сетку с шагом по радиальной и осевой координатам  $2,5 \cdot 10^{-2}$  мм. Шаг по временной сетке составлял 0,001 с.

## Результаты и обсуждения

Результаты влияния радиационного теплообмена на длительность нагрева датчика до требуемой температуры для различных значений последней представлены на рисунках 2–4. На всех представленных графиках кривая 1 – зависимость полученная с учетом радиационной составляющей, 2 – зависимость, полученная в условиях действия только кондуктивного теплообмена.

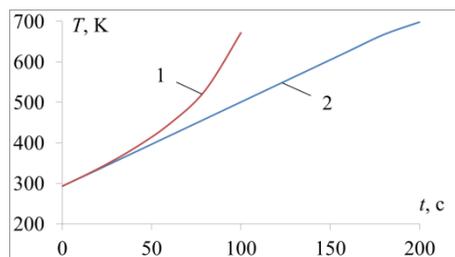


Рис. 2. Необходимая длительность нагрева при 700 К

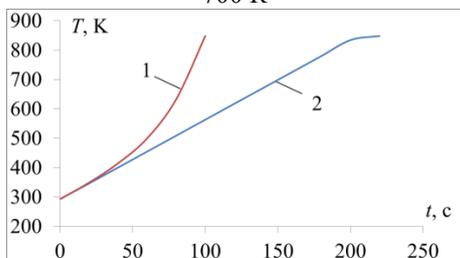


Рис. 3. Необходимая длительность нагрева при 800 К

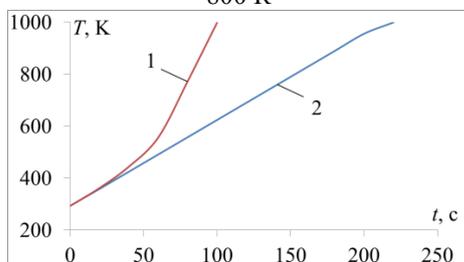


Рис. 4. Необходимая длительность нагрева при 1000 К

Из рис. 2–4 видно, что влияние радиационной составляющей проявляется в большей степени с ростом измеряемой температуры, что приводит к существенной разнице в необходимой длительности нагрева.

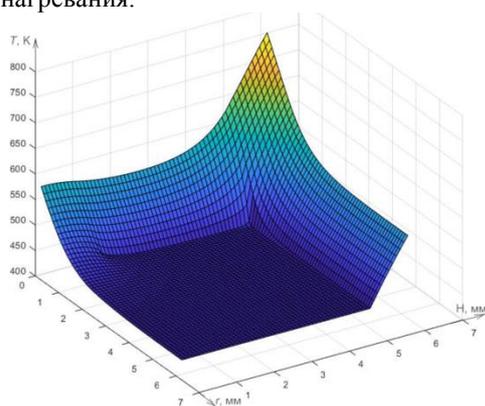


Рис. 5. Температурное поле в чувствительном элементе ТЭП

На рис. 5 показано температурное поле в чувствительном элементе промышленной термопары через 50 секунд после начала нагрева.

Температурное поле (рис. 5) иллюстрирует значительную неоднородность чувствительного элемента термопары, что выражается в ярко выраженных границах участка ТЭП. Такая неоднородность существенно усложняет процесс решения задач теплопереноса в подобных системах.

#### Заключение

В результате работы разработана модель теплопереноса в системе «датчик температуры – объект измерения» при измерении высоких (свыше 700 К) температур в условиях наличия воздушного зазора. Показано, что влияние радиационной составляющей увеличивается с ростом температуры и наиболее заметно при температурах более 500 К. Полученные результаты могут быть учтены при оценке работы ТЭП на блоках тепловых электрических станций, разработанная модель будет полезна при прогностическом моделировании работы систем автоматического контроля температуры и блокировок на ТЭС.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 18-38-00028).

#### Список использованных источников

1. Kim, H., Kim, E.K., Kim, J., Lee, K.S., Kim, S., Han, Y. Prediction-based feedforward control of superheated steam temperature of a power plant // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2015. – Vol. 71. – P. 351-357.
2. Atroshenko Y.K., Bychkova A.A. Process simulating of heat transfer in high-temperature thermocouples // MATEC Web of Conferences 23, 01006 (2015).
3. Мирошкин М.В. Выбор датчика для измерения температуры // Экспозиция Нефть Газ. – 2014. – № 2 (34). – С. 15-16.
4. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of radiative heat and mass transfer mechanism in system water droplet - high-temperature gases on integral characteristics of liquid evaporation // Thermal Science. – 2015. – Vol. 19. – № 5. – P. 1541-1552.
5. Заричняк Ю.П., Рамазанова А.Э., Эмиров С.Н. Вклад теплового излучения при измерении теплопроводности образцов песчаника // Физика твердого тела. – 2013. – Т. 55, № 12. – С. 2318–2322.
6. Samarskii A. A., The Theory of Difference Schemes, Marcel Dekker, Inc., USA, 2001.