

**УДК 536.2.083**

***Р.В. Попов, Э.В. Сысоев***

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В  
ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТАХ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ**

## ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ НЕПОДВИЖНОГО ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

В основе большого количества методов бесконтактного неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств (ТФС) твердых материалов лежат математические модели, описывающие процесс распространения тепла в исследуемых объектах при воздействии на них подвижного точечного источника тепла постоянной мощности [1 – 4]. Подобные методы обладают рядом определенных недостатков. Так, во многих из них вообще не учитываются тепловые потери, происходящие с открытой поверхностью исследуемого объекта в окружающую среду за счет конвективного и лучистого теплообмена, а также потери, вызванные частичным отражением лазерного луча от поверхности тела [1, 2].

В последнее время появились разработки, основанные на использовании подвижного источника тепла и позволяющие при помощи различных компенсационных методов в той или иной степени учесть влияние тепловых потерь на точность результатов измерения ТФС [3, 4].

Однако, особенностью всех методов НК ТФС материалов, использующих подвижную измерительную головку, является то, что в процессе измерений при ее движении над поверхностью образца происходит изменение его свойств (шероховатости, степени черноты) в зависимости от местоположения пятна нагрева, обусловленное тем, что свойства поверхности материала, как правило, не являются однородными по всей его площади. Это не позволяет в полной мере компенсировать тепловые потери, вызванные отражением луча лазера от поверхности образца, поскольку по мере движения пятна нагрева коэффициент поглощения в каждой из точек теплового воздействия будет постоянно изменяться.

Еще один, общий недостаток рассматриваемых методов – наличие механически подвижных узлов, вносящих дополнительные погрешности в результаты измерений.

Для устранения недостатков, присущих рассмотренным выше методам измерения ТФС материалов, разработана математическая модель процесса распространения тепла в исследуемых объектах при бесконтактном воздействии на них от неподвижного точечного источника тепла. За основу модели взято известное уравнение, описывающее процесс распространения тепла непрерывного точечного источника мощностью  $q$ , выделяющегося на поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела, и имеющее следующий вид [5]

$$T(R, \tau) = \frac{q}{4\pi\lambda R} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{R}{\sqrt{4a\tau}} \right) \right] + T_c, \quad (1)$$

где  $T(R, \tau)$  – температура в рассматриваемой точке, К;  $T_c$  – температура окружающей среды, К;  $\tau$  – время с момента начала действия источника тепла, с;  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  – расстояние от источника тепла  $q$  до рассматриваемой точки тела с координатами  $x, y, z$ , м;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\Phi$  – функция интеграла вероятности.

**НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ (1) ЯВЛЯЕТСЯ ЗАТРУДНИТЕЛЬНЫМ ИЗ-ЗА НЕВОЗМОЖНОСТИ ВЫРАЗИТЬ ИЗ НЕГО В АНАЛИТИЧЕСКОМ ВИДЕ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ  $a$ . РЕШИТЬ ЭТУ ЗАДАЧУ МОЖНО ПУТЕМ АППРОКСИМАЦИИ ФУНКЦИИ ИНТЕГРАЛА ВЕРОЯТНОСТИ  $\Phi$  БОЛЕЕ ПРОСТЫМ ВЫРАЖЕНИЕМ (ПРИ НАЛОЖЕНИИ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПОЛУЧЕННУЮ В РЕЗУЛЬТАТЕ МАТЕМАТИЧЕСКУЮ МОДЕЛЬ). РАСЧЕТЫ ПОКАЗАЛИ, ЧТО ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ С КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ**

**$a \geq 10^{-7}$  М<sup>2</sup>/С ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ УСЛОВИЯ  $\frac{R}{\sqrt{\tau}} \leq 0,0003$  ФУНКЦИЮ  $\Phi \left( \frac{R}{\sqrt{4a\tau}} \right)$  В (1) МОЖНО**

**ЗАМЕНИТЬ ДРОБЬЮ  $\frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}}$ , ПРИЧЕМ ПОГРЕШНОСТЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ  $T(R, \tau)$  В ЭТОМ**

**СЛУЧАЕ НЕ ПРЕВЫСИТ 1 %.**

С учетом данной замены можно записать следующее выражение, описывающее процесс распространения тепла при действии непрерывного точечного источника тепла на поверхность полуограниченного в тепловом отношении тела

$$T(R, \tau) = \frac{q}{4\pi\lambda R} \left[ 1 - \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} \right] + T_c. \quad (2)$$

Выражение (2) не учитывает тепловые потери, вызванные неполным поглощением тепловой энергии источника тепла поверхностью исследуемого объекта, а также конвективным и лучистым теплообменом поверхности исследуемого тела с окружающей средой. Кроме того, часть тепла поглощается окружающей средой при прохождении через нее излучения от источника тепла до объекта исследования в результате молекулярного поглощения и рассеяния на частицах пыли и влаги, содержащихся в окружающей среде (атмосфере).

На основе выражения (2) была разработана математическая модель [6], учитывающая влияние тепловых потерь

$$T(R, \tau) = T - T_c = \frac{\varepsilon\beta q_{\text{ит}} - q_{\text{кл}}}{4\pi\lambda R} \left( 1 - \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} \right), \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения поверхности нагретого тела;  $\beta$  – прозрачность окружающей среды;  $q_{\text{ит}}$  – мощность точечного источника тепла;  $q_{\text{кл}} = q_{\text{к}} + q_{\text{л}}$  – суммарные потери, вызванные конвективным и лучистым теплообменом поверхности тела с окружающей средой.

Наибольшее влияние на температурное поле поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии на него неподвижного точечного источника тепла оказывает коэффициент излучения поверхности тела  $\varepsilon$ , поскольку для большинства твердых непрозрачных материалов он может иметь значение от 0,2 до 0,9. На температурное поле материалов с малым значением коэффициента теплопроводности  $\lambda$  большое влияние также оказывают потери  $q_{\text{кл}}$ . В большинстве задач теплового контроля эффект поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла (параметр  $\beta$ ) несущественен ввиду малого расстояния до объекта, однако на территории промышленных объектов, где атмосфера может быть загрязнена различными примесями (пыль, влага и др.), его влияние значительно возрастает. Кроме того, параметры  $\varepsilon$  и  $q_{\text{кл}}$  зависят также и от температуры.

Так как параметры  $\varepsilon$ ,  $\beta$  и  $q_{\text{кл}}$  весьма трудно измерить с требуемой для теплофизического эксперимента точностью, то основной задачей при разработке методов бесконтактного НК ТФС материалов является минимизация влияния этих параметров на результаты измерений искомых ТФС, чего можно достичь за счет использования различных компенсационных методов.

На основе полученной математической модели разработан бесконтактный метод НК ТФС твердых материалов [6], заключающийся в воздействии на поверхность исследуемого образца неподвижным точечным источником тепла определенной мощности и проведении на этой поверхности пространственно-температурных измерений. Тепловое воздействие на исследуемый объект осуществляют от лазера, а контроль избыточных температур на поверхности объекта осуществляется по ее электромагнитному излучению двумя термоприемниками.

Таким образом, использование разработанной математической модели при создании новых методов бесконтактного НК ТФС материалов позволяет избавиться от недостатков, присущих методам с подвижной измерительной головкой, и в большей степени уменьшить влияние параметров  $\varepsilon$ ,  $\beta$ ,  $q_{\text{кл}}$  на результаты измерений искомых ТФС, что существенно повышает метрологический уровень создаваемых методов и повышает эффективность применения представленной в статье модели в теории и практике бесконтактных теплофизических измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 А.с. 1056015 СССР, МКИ G01N 25/18. Способ определения теплофизических свойств материалов / Ю.А. Попов, В.В. Березин, В.М. Коростелев. Заявл. 30.04.82; Оpubл. 23.11.83.

2 А.с. 1193555 СССР, МКИ G01N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов без нарушения их целостности / В.Н. Чернышов. Заявл. 16.05.84; Оpubл. 23.11.85.

3 Пат. 2166188 РФ. Бесконтактный адаптивный способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / Т.И. Чернышова, Э.В. Сысоев. Заявл. 5.01.2000; Оpubл. 27.04.2001.

4 Пат. 2168168 РФ. Способ бесконтактного контроля теплофизических характеристик материалов / Т.И. Чернышова, Э.В. Сысоев. Заявл. 4.08.1999; Оpubл. 27.05.2001.

5 Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.

6 Попов Р.В., Чернышов В.Н., Сысоев Э.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и устройство для его осуществления // Контроль. Диагностика, 2004. № 12 (78). С. 37 – 42.