

*И.В. Ерохин, О.Н. Попов**

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время одной из наиболее актуальных тем является поиск энергосберегающих мероприятий и инженерных решений по созданию ограждающих конструкций зданий и сооружений с минимальными тепловыми потерями [1]. Большую роль в этом играют создание новых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий, а также разработка новых эффективных методов и средств неразрушающего определения теплофизических свойств (ТФС) материалов и изделий.

Таким образом, разработка информационно-измерительной системы неразрушающего контроля (НК), позволяющей повысить точность результатов определения ТФС материалов как на стадии технологического контроля в процессе их производства, так и в процессе эксплуатации изделий из них, является актуальной.

Цель работы состоит в решении проблемы повышения точности результатов НК ТФС изделий из твердых неметаллических материалов.

Теоретическое обоснование. На поверхности полуограниченно-го в тепловом отношении тела расположен нагреватель в виде полосы шириной $2h$, через которую в материал подается тепловой поток \bar{q}_0 (рис. 1).

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. ГОУ ВПО ТГТУ Н.Ф. Майниковой.

Температура T в точке с координатами $(0; 0)$ в момент времени τ в безразмерном виде

$$\Theta = \frac{2Fo^{0.5}}{\pi^{0.5}} \times \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{1}{2Fo^{0.5}} \right] - \frac{1}{2(\pi Fo)^{0.5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{1}{4Fo} \right] \right\}. \quad (1)$$

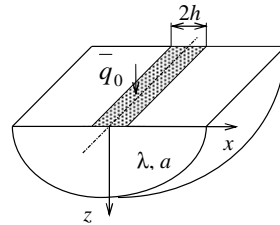


Рис. 1. Тепловая схема

Выражение для температуры поверхности $z = 0$ в точке с координатой x для больших значений τ

$$T(x, 0, \tau) = \frac{\bar{q}_0 h}{\lambda \pi} \left\{ \ln(4a\tau) - \frac{h+x}{2h} \ln(h+x)^2 - \frac{h-x}{2h} \ln(h-x)^2 + 2 - \gamma \right\}, \quad (2)$$

где γ – число Эйлера.

Выражение (2) в безразмерной форме применительно к точке с координатами $(0; 0)$

$$\Theta = (1/\pi) [\ln(4Fo) + 2 - \gamma]. \quad (3)$$

Расчетные зависимости для вычисления ТФС получены из выражения 2:

$$\lambda = a/b_1 ; a = \exp[(b_0/b_1) + \beta].$$

Здесь λ, a – значения теплопроводности и температуропроводности материала; b_0, b_1 – коэффициенты, определенные из термограмм, снятых на материале.

Измерительная схема. Тела 1 и 2 характеризуются различными ТФС (λ_1, a_1 и λ_2, a_2). Размеры первого тела: длина – l_1 ; толщина – d_1 ; ширина – $2H_1$. Размеры второго тела: длина – l_2 ; толщина – d_2 ; ширина – $2H_2$. В плоскости контакта тел действует линейный источник тепла в виде полосы (рис. 2). Первое тело представляет собой исследуемый образец. Второе тело – подложка измерительного зонда (ИЗ).

Измерительная схема информационно-измерительной системы. Информационно-измерительная система (ИИС) состоит из персонального компьютера (ПК), измерительно-управляющей платы РС1-1202Н, зонда, регулируемого блока питания (БП) (рис. 3). ИЗ обеспечивает создание теплового воздействия на исследуемое изделие с помощью нагревателя (Н), фиксирование температуры в заданных точках контроля термоэлектрическими преобразователями (ТП). В качестве ТП используется термopара, горячий спай которой устанавливается в плоскости контакта ИЗ с исследуемым объектом. Мощность и длительность теплового воздействия БП задаются программно через ин-

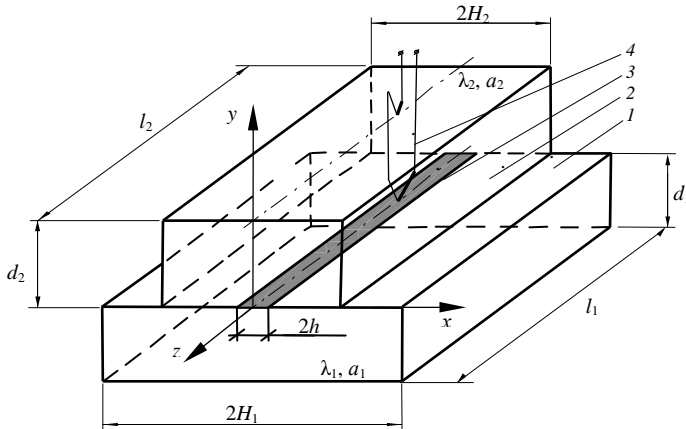


Рис. 2. Измерительная схема:
 1 – изделие; 2 – измерительный зонд;
 3 – нагреватель; 4 – термодатчик

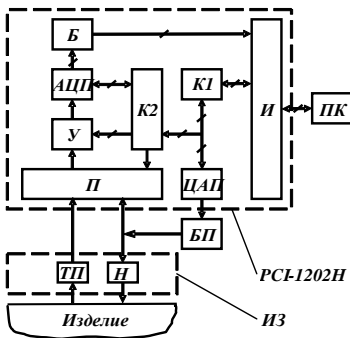


Рис. 3. Структурная схема ИС с платой РС-1202Н

терфейс (И), контроллер К1, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Сигналы с ТП поступают через мультиплексор (П), усилитель (У), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), буфер обмена (Б) и интерфейс (И) в ПК. Контроллер К2 обеспечивает необходимый порядок опроса каналов (которых может быть несколько, так как ТП могут быть установлены на некотором расстоянии r_i от нагревателя в плоскости контакта подложки ИЗ и изделия) и различные диапазоны измерения на каждом из них.

Численное исследование. На рис. 4 представлены термограммы $\Theta = f(F_0)$. Кривая 1 получена численным решением задачи при соотношении $d_2/h = 5$ методом конечных элементов. Кривые 2 и 3 получены по выражениям (1) и (3) с помощью системы аналитических вычислений Maple.

На термограммах (рис. 4) выделены участки I, II и III. На первом (I) участке тепловой поток, проходящий через точку контроля, является переменным во времени и соответствует начальной стадии развития теплового процесса. Второй (II) участок характеризуется регуляризацией теплового режима в локальной области нагревателя и

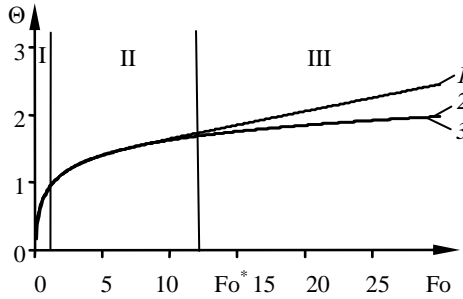


Рис. 4. Термограммы $\Theta = f(\text{Fo})$

II. Тепловой поток, проходящий через точки контроля, становится практически постоянным. Это позволяет использовать модель (3) для второго (рабочего) участка термограммы. Третий (III) участок характеризуется тем, что нарушаются условия полуограниченности объекта.

Графические зависимости $\Theta = f(\text{Fo})$, полученные по формулам (1) и (3) (кривые 1, 2), а также численные решения для соотношений $b_2/h = 8; 5; 4; 3,5$ и 3 (кривые 3 – 7) собраны в семейство на рис. 5

На термограммах определены границы рабочих участков, зная которые для различных соотношений b_2/h , найдена зависимость $\text{Fo}^* = f(b_2/h)$ (рис. 6). По оси ординат представлены значения Fo^* , соответствующие времени окончания второго (II) участка на термограммах (1 – 7). Представленная зависимость позволяет определить размеры подложки ИЗ. Например, при $\text{Fo}^* = 12,3$ толщина подложки измерительного зонда $b_2 \geq 4,85$ мм.

Численное исследование теплопереноса в полуограниченном теле от линейного источника тепла постоянной мощности позволило рассмотреть вопросы оптимизации процесса при применении разработанного неразрушающего метода для определения ТФС теплоизоляционных

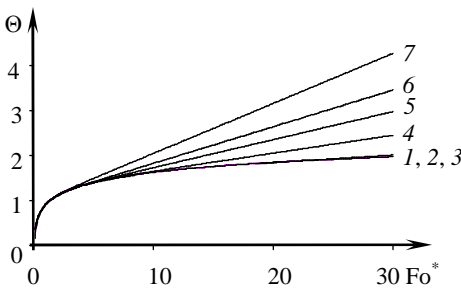


Рис. 5. Термограммы

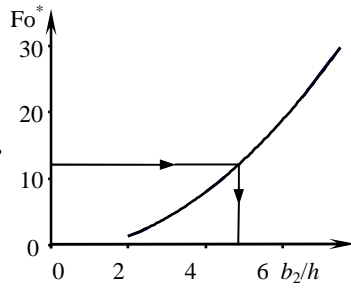


Рис. 6. $\text{Fo}^* = f(b_2/h)$

материалов и изделий (с кажущейся плотностью не более 600 кг/м^3 и теплопроводностью при $25 \text{ }^\circ\text{C}$ не выше $0,175 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$), пластических масс и полимерных материалов с температуропроводностью $a = (0,01 \dots 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и теплопроводностью в пределах $\lambda = 0,2 \dots 0,8 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$.

Кафедра «Гидравлика и теплотехника» ГОУ ВПО ТГТУ.