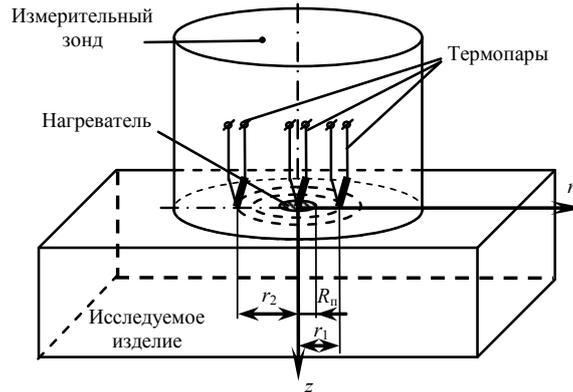


**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ  
ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ\***

В методах неразрушающего контроля теплофизических свойств (ТФС) твердых материалов [1] и определения температурно-временных характеристик структурных переходов в полимерах, измерительная схема которых представлена на рис. 1, тепловое воздействие на исследуемое тело с равномерным начальным распределением температуры осуществляется с помощью нагревателя постоянной мощности, встроенного в подложку измерительного зонда (ИЗ). В эксперименте фиксируется избыточная температура исследуемого тела  $T$  в центре нагревателя и на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  от центра. Известно, что распределение температурного поля в исследуемом теле от плоского круглого источника тепла постоянной мощности радиусом  $R_n$  при  $\tau \gg 0$  близко к распределению температурного поля в сферическом полупространстве со сферической полостью радиусом  $R$ , через которую осуществляется заданное тепловое воздействие с тем же тепловым потоком  $q$ .

Расчетное уравнение, описывающее термограмму на определенном температурно-временном интервале (на рабочем участке), получено решением соответствующей краевой задачи [1] и имеет вид:



**Рис. 1. Измерительная схема**

$$T(r, \tau) = - \left( \frac{qR^2(r-R)}{\sqrt{\pi}\sqrt{a_1}r(\lambda_1 + \lambda_2)} + \frac{qR^3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\sqrt{\pi}r(\lambda_1 + \lambda_2)^2} \right) \frac{1}{\sqrt{\tau}} + \frac{qR^2}{(\lambda_1 + \lambda_2)r}, \quad (1)$$

$$r > R, \quad \tau > 0,$$

где  $a_1, \lambda_1, \varepsilon_1, a_2, \lambda_2, \varepsilon_2$  — соответственно температуропроводности, теплопроводности и тепловые активности материалов исследуемого тела и подложки ИЗ;  $\tau$  — время;  $r$  — координата.

При определении условий адекватности модели сферического полупространства реальному тепловому процессу найдено [1], что соотношение радиусов  $R$  и  $R_n$ , при котором температурные поля, создаваемые сферическим поверхностным и круглым плоским нагревателями, будут идентичными, имеет вид:

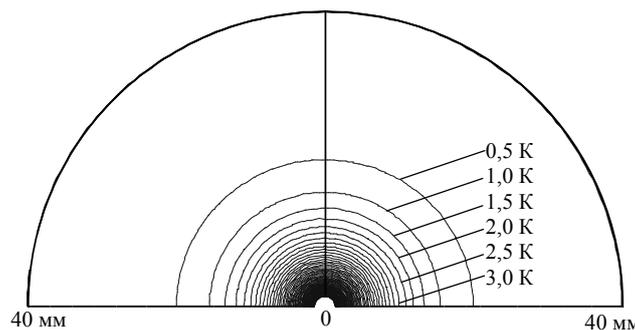
$$R = \frac{R_n}{2}. \quad (2)$$

Решение (1), полученное для сферического источника тепла, при  $r = R$  имеет вид:

$$T(R, \tau) = \frac{qR}{(\lambda_1 + \lambda_2)} - \frac{qR^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\sqrt{\pi}(\lambda_1 + \lambda_2)^2} \frac{1}{\sqrt{\tau}}. \quad (3)$$

При исследовании температурных полей в системе зонд–изделие авторы воспользовались численным моделированием двумерных полей методом конечных элементов с помощью пакета ELCUT [2].

На рис. 2 представлено распределение температуры ( $T$ ) от поверхностного сферического нагревателя постоянной мощности в системе



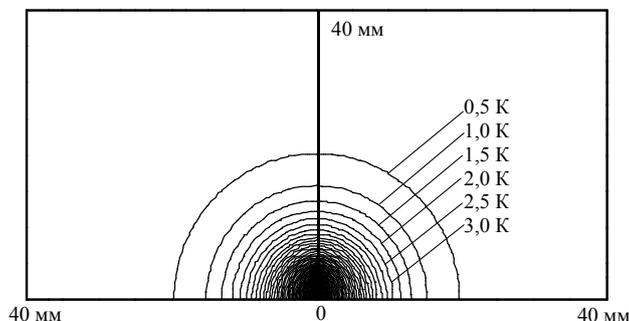
**Рис. 2. Распределение температуры**

\* Работа выполнена под руководством доц. Н.Ф. Майниковой.

двух полуограниченных тел при идеальном тепловом контакте между ними при следующих условиях:  $\tau = 500$  с;  $q = 5000$  Вт · м<sup>-2</sup>;  $R = 0,002$  м;  $a_1 = a_2 = 0,113 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup> · с<sup>-1</sup>;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 743,47$  Вт · с<sup>0,5</sup> · м<sup>-2</sup> · К<sup>-1</sup>;  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,25$  Вт · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>;  $c_1 = c_2 = 1005$  Дж · кг<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>;  $\rho_1 = \rho_2 = 2200$  кг · м<sup>-3</sup>; шаг изотерм – 0,5 К.

На рис. 3 представлено распределение температуры ( $T$ ) от плоского круглого нагревателя постоянной мощности в системе двух полуограниченных тел при идеальном тепловом контакте между ними при следующих условиях:  $\tau = 500$  с;  $q = 5000$  Вт · м<sup>-2</sup>;  $R_n = 0,004$  м;  $a_1 = a_2 = 0,113 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup> · с<sup>-1</sup>;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 743,47$  Вт · с<sup>0,5</sup> · м<sup>-2</sup> · К<sup>-1</sup>;  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,25$  Вт · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>;  $c_1 = c_2 = 1005$  Дж · кг<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>;  $\rho_1 = \rho_2 = 2200$  кг · м<sup>-3</sup>; шаг изотерм – 0,5 К.

Авторами также исследованы распределения температурных полей от плоского круглого нагревателя постоянной мощности в системе двух полуограниченных тел с различными ТФС в случае их идеального теплового контакта и при идеальной теплоизоляции между ними [1].



**Рис. 3. Распределение температуры**

Определение условий адекватности математической модели сферического полупространства реальному тепловому процессу от плоского круглого источника тепла [1], визуализация температурных полей в системе зонд–изделие позволили применить расчетные зависимости (1), (3) на рабочих участках термограмм в зондовом контактном методе неразрушающего контроля ТФС, а также при определении температурно-временных характеристик структурных переходов в полимерах и композиционных материалах на их основе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков, Н.П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 288 с.
2. ELCUT. Руководство пользователя. – СПб., 2003. – 231 с.
3. Пат. 2167412 РФ, G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических свойств материалов / Жуков Н.П., Майникова Н.Ф., Муромцев Ю.Л., Рогов И.В. – № 99103718 ; заявл. 22.02.99 ; опубл. 20.05.01, Бюл. № 14.
4. Свидетельство об официальной регистрации программы. – № 2003610931. Определение ТФХ / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, А.С. Чех.

Кафедра «Гидравлика и теплотехника»