

А. А. Чуриков, И. С. Сынков

## АНАЛИЗ И УЧЕТ ВЛИЯНИЯ КОНТАКТНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Соприкосновение поверхностей двух твердых тел происходит в отдельных участках и точках. Это является причиной неравенства температур поверхностей этих тел в плоскости контакта. Но тогда и плотность теплового потока будет отличаться от идеально рассчитанной и участвующей в расчетных формулах, что вызвано наличием между контактирующими (а также склеенными) телами поверхностного термического сопротивления  $H$ , которое представляет собой величину, обратную коэффициенту поверхностной теплопроводности.

В измерительном устройстве исследуемый образец приводится в контакт с поверхностью эталонного блока, состоящего из двух эталонных образцов с известными теплофизическими свойствами (ТФС).

В обоих эталонах на определенных расстояниях от нагревателя  $x = l_3$  и  $x = -l_1$  расположены датчики температуры – термопреобразователи сопротивления. В процессе эксперимента фиксируется температура  $U_3(l_3, t)$  и  $U_1(-l_1, t)$  в верхнем и нижнем эталонных образцах, соответственно, а также мощность источника тепла  $Q(t)$ .

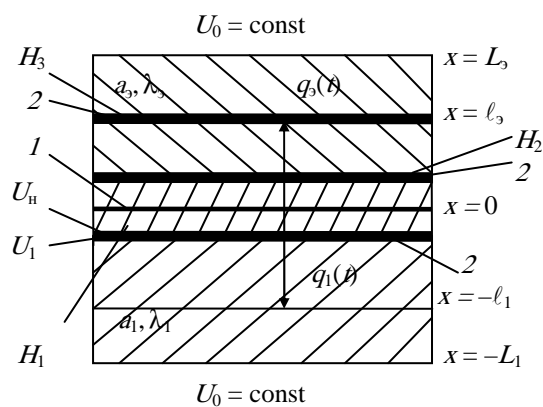
В реальных условиях изготовления измерительного устройства и проведения теплофизического эксперимента возникают два вида контактных термических сопротивлений, влияющих на результат вычислений, это контактные сопротивления в местах:

- крепления нагревателя к основному массиву эталонного блока;
- соприкосновения эталонного и исследуемого образцов.

Покажем учет влияния контактных термических сопротивлений (КТС) в расчетных зависимостях по определению теплофизических свойств материалов на примере измерительного устройства с внешним термостатированием.

Схемы, поясняющие расположение контактных термических сопротивлений в эталонном блоке, представлены на рис. 1. Эталонный блок состоит из двух образцов: верхний (над нагревателем) имеет теплофизические характеристики  $a_3$  и  $\lambda_3$ , нижний, соответственно,  $a_1$  и  $\lambda_1$ .

Тогда связь теплового потока  $q_1(t)$  и температуры  $U_1(0, t)$  для плоскости  $x = 0$  будет иметь вид (рис. 1):



**Рис. 1. Эталонный блок с контактными термическими сопротивлениями под нагревателем:**

1 – плоский нагреватель; 2 – слой клея  
(термическое контактное сопротивление  $H_1, H_2, H_3$ )

$$q_1(t) = \lambda_1 \frac{\partial U_1(0, t)}{\partial x} \equiv \frac{1}{H_1} [U_n(0, t) - U_1(0, t)], \quad (1)$$

где  $U_1(0, t)$  и  $U_n(0, t)$  – температура нижнего эталонного образца и температура нагревателя в плоскости контакта  $x = 0$ .

Для определения ВИХ теплового потока, идущего от нагревателя в верхний эталонный образец, следует использовать расчетные зависимости

$$q_3^*(p) = \frac{\left[ \frac{Q}{p} - \frac{U_3^*(l_3, p) \lambda_1 B_1}{[\text{th}(B_1 L_1) + \lambda_1 B_1 H_1] \text{ch}(B_3 l_3)} \right]}{\left[ \frac{\lambda_1 B_1 \text{th}(B_3 l_3)}{\lambda_3 B_3 [\text{th}(B_1 L_1) + \lambda_1 B_1 H_1]} + 1 \right]}; \quad (2)$$

$$q_3^*(p) = \frac{Q}{p} - \frac{U_1^*(-l_1, p) \lambda_1 B_1 \text{sh}(B_1 L_1)}{(\text{th}(B_1 L_1) - \lambda_1 B_1 H_1) \text{sh}[B_1(L_1 - l_1)]}. \quad (3)$$

Если датчик температуры  $U(l_3, t)$ , расположенный в верхнем эталонном образце, выйдет из строя можно использовать зависимость (3), что является одним из преимуществ рассматриваемого метода.

Связь теплового потока  $q_3(t)$  и температуры  $U_3(0, t)$  для плоскости  $x = 0$  будет иметь вид:

$$q_3(t) = -\lambda_3 \frac{\partial U_3(0, t)}{\partial x} = \frac{1}{H_2} (U_n(0, t) - U_3(0, t)), \quad (4)$$

где  $U_3(0, t)$  и  $U_n(0, t)$  – температура верхнего эталонного образца и температура нагревателя в плоскости крепления  $x = 0$ ;

$$q_3^*(p) = \frac{\left[ \frac{Q}{p} - \frac{U_3^*(l_3, p) \lambda_1 B_1}{\text{th}(B_1 L_1) \text{ch}(B_3 l_3)} \right]}{\left[ \frac{\lambda_1 B_1 \text{th}(B_3 l_3)}{\lambda_3 B_3 \text{th}(B_1 L_1)} + 1 \right] + \frac{H_2 \lambda_1 B_1}{\text{th}(B_1 L_1)}}. \quad (5)$$

Связь теплового потока  $q_n(t)$ , поступающего с поверхности  $x = L_3$  в исследуемый образец, с температурой верхнего эталонного и исследуемого образцов имеет вид:

$$q_n(t) = -\lambda_n \frac{\partial U_n(L_3, t)}{\partial x} = \frac{1}{H_3} (U_3(L_3, t) - U_n(L_3, t)), \quad (6)$$

где  $U_3(L_3, t)$  и  $U_n(L_3, t)$  – температура верхнего эталонного образца и температура исследуемого образца в плоскости  $x = L_3$ .

Если предположить, что в области нагревателя идеальный тепловой контакт и  $H_1 = H_2 = 0$ , тогда  $q_3^*(p)$  будет определяться

$$q_3^*(p) = \frac{U_3^*(l_3, p) \left\{ \text{ch}(B_3 l_3) + [B_3 \lambda_3 \text{sh}(B_3 l_3)] [H_3 + \bar{k}] \right\}}{\left\{ \frac{\text{sh}[B_3(L_3 - l_3)]}{B_3 \lambda_3} + \text{ch}[B_3(L_3 - l_3)] [H_3 + \bar{k}] \right\}}, \quad (7)$$

где  $\bar{k} = \frac{\text{th}(B_n h)}{B_n \lambda_n}$ .

Определение теплофизических свойств исследуемого материала с учетом всех контактных термических сопротивлений можно выполнить следующим образом.

$$U_n^*(L_3, p) = U_3^*(L_3, p) - H_3 q_n^*(p). \quad (8)$$

Теплопроводность  $\lambda_n$  рассчитывается из уравнения

$$\lambda_n = \frac{q_n^*(p) h \operatorname{th}(\sqrt{g_n})}{\sqrt{g_n} [U_3^*(L_3, p) - q_n^*(p) H_3]}. \quad (9)$$

Для определения коэффициента температуропроводности необходимо найти следующее соотношение:

$$\frac{[U_3^*(L_3, p) - q_n^*(p) H_3] q_n^*(kp)}{[U_3^*(L_3, kp) - q_n^*(kp) H_3] q_n^*(p)} = F(g_n, k). \quad (10)$$

В расчетных формулах (9) и (10) величину ВИХ плотности теплового потока  $q_n^*(p)$  или  $q_n^*(kp)$  рассчитывают по ранее показанным формулам.

Величина  $q_3^*(p)$  с учетом контактных термических сопротивлений  $H_1$  и  $H_2$ , или одного из них, определяется из уравнений (2), (5) или (7).

*Кафедра «Автоматизированные системы и приборы»*