

УДК 006.91 (083.131)

В.Б. Латипов, О.Ш. Хакимов

*Научно-исследовательский институт стандартизации, метрологии и сертификации, Ташкент, Республика Узбекистан**Центр национальных эталонов, Ташкент, Республики Узбекистан***ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СТАЦИОНАРНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ***Рассмотрены стационарные методы измерения теплопроводности материалов, в том числе текстильных и волокнистых, применительно к плоскому, коаксиально-цилиндрическому и сферическому (шаровому) тепловым слоям. Приведены уравнения для оценки характеристик неопределенности измерения этих методов.***теплопроводность, материал, стационарный метод, измерения, неопределенность**

Экспериментальные методы измерения теплопроводности  $\lambda$  материалов, в том числе текстильных и волокнистых, принято разделять на две группы, один из которых стационарные.

Стационарные методы измерения [1 – 3], как известно, основаны на исследовании неизменных во времени температурных полей, т.е. на свойствах стационарного температурного поля, описываемого законом Фурье:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot S$$

и дифференциальным уравнением теплопроводности, которое в случае стационарного теплообмена и независимости теплопроводности от температуры принимает вид

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} = 0, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(мК);  $\partial T/\partial n$  – градиент температуры в направлении нормали к изотермической поверхности, К/м;  $S$  – поверхность плоского слоя, нормальная к направлению теплового потока, м<sup>2</sup>.

В зависимости от геометрических параметров температурного поля эти методы, как известно, делятся на стационарные методы плоского слоя, коаксиальных цилиндров, нагретой нити, сферического (шарового) слоя [4]. Все они основываются на частных решениях уравнения (1) при определенных граничных условиях.

Стационарные методы могут быть использованы для определения теплопроводности, как твердых тел, так и материалов для одежды и средств защиты, жидкостей и газов.

Так, применительно к однородным температурным полям плоского, цилиндрического и шарового слоев при соответствующих граничных условиях теплопроводность определяется из соотношения

$$\lambda = \frac{K \cdot q}{T_1 - T_2} = \frac{K \cdot q}{\Delta T}, \quad (2)$$

где  $q$  – тепловой поток, Вт;

$T_1$  и  $T_2$  – температура наружной и внутренней поверхности слоя, °С;

$$\Delta T = |T_1 - T_2|;$$

$K$  – коэффициент формы исследуемого образца, м<sup>-1</sup>.

Коэффициент формы для неограниченного плоского, цилиндрического и шарового слоя определяется по формулам

$$K = b/S;$$

$$K = \ln \frac{D_2}{D_1} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \ell}; \quad (3)$$

$$K = \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \cdot \frac{1}{2\pi},$$

где  $b$  – толщина плоского слоя, м;

$D_1, D_2$  – внутренний и наружный диаметры цилиндрического и шарового слоя соответственно;

$\ell$  – длина цилиндрического слоя.

Таким образом, для того, чтобы определить теплопроводность исследуемого материала  $\lambda$ , необходимо измерить в стационарном режиме тепловой поток  $q$ , проходящий через исследуемый образец, и температуру его изотермических поверхностей.

Суммарная стандартная неопределенность выходных величин, как известно [5, 6], рассчитывают по формуле

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}, \quad (4)$$

где частные производные  $\partial f/\partial x_i = c_i$  – коэффициенты чувствительности.

Используя формулу (4) к рассматриваемой нами задаче, т.е. к (2), получим выражения для оценки суммарной стандартной неопределенности  $u_c(\lambda)$  определения суммарного теплового сопротивления материалов стационарными методами измерения

$$u_c(\lambda) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial K}\right)^2 \cdot u^2(K) + \left(\frac{\partial f}{\partial q}\right)^2 \cdot u^2(q) + \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta T}\right)^2 \cdot u^2(\Delta T)}; \quad (5)$$

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial K} = \frac{q}{\Delta T}; \quad c_2 = \frac{\partial f}{\partial q} = \frac{K}{\Delta T}; \quad c_3 = \frac{\partial f}{\partial \Delta T} = \frac{K \cdot q}{(\Delta T)^2}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) после несложных математических преобразований получим

$$u_{co}(\lambda) = \sqrt{u_{co}^2(K) + u_{co}^2(q) + u_{co}^2(\Delta T)}, \quad (7)$$

где  $u_{co}(\lambda)$ ,  $u_{co}(K)$ ,  $u_{co}(q)$ ,  $u_{co}(\Delta T)$  – относительные суммарные стандартные неопределенности измерения теплопроводности  $\lambda$ , коэффициента формы  $K$ , теплового потока  $q$  и разности температур  $\Delta T$  изотермических поверхностей исследуемого образца соответственно.

Относительная суммарная стандартная неопределенность  $u_{co}(K)$  измерения коэффициента формы  $K$ , в случае плоского слоя, в соответствии (3) и (4), оценивается по формуле

$$u_{co}(K) = \sqrt{u_o^2(b) + u_{co}^2(S)}, \quad (8)$$

где  $u_{co}(S)$  – относительная суммарная стандартная неопределенность измерения площади  $S$  поверхности исследуемого образца (плоского слоя);

$u_o(b)$  – стандартная неопределенность измерения толщины  $b$  исследуемого образца (плоского слоя).

Аналогично получим формулы для оценки  $u_{co}(K)$  в случаях цилиндрического слоя

$$u_{co}(K) = \sqrt{u_{co}^2(D) + u_o^2(\ell) + u_o^2(\pi)}, \quad (9)$$

где

$$u_{co}(D) = \ln \frac{D_1}{D_2} \cdot \sqrt{\left(\frac{u(D_1)}{D_1}\right)^2 + \left(\frac{u(D_2)}{D_2}\right)^2}, \quad (10)$$

и шарового слоя

$$u_{co}(K) = \sqrt{u_c^2(D) + u_o^2(\pi)}, \quad (11)$$

где

$$u_c(D) = \sqrt{\frac{1}{D_1^2} \cdot \left(\frac{u(D_1)}{D_1}\right)^2 + \frac{1}{D_2^2} \cdot \left(\frac{u(D_2)}{D_2}\right)^2}; \quad (12)$$

$u_o(\ell)$ ,  $u_o(\pi)$  – относительные стандартные неопределенности оценки длина цилиндрического слоя и числа  $\pi$ ;  $u(D_1)$ ,  $u(D_2)$  – стандартные неопределенности оценки внутреннего и наружных диаметров цилиндрического слоя.

Кроме рассмотренных источников неопределенности на точность измерения теплопроводности материалов стационарными методами влияют также:

- 1) однородность температурного поля в исследуемых образцах;
- 2) тепловые потери, в том числе с боковых поверхностей тепловой ячейки;
- 3) термическое сопротивление в местах контактов поверхностей пробы материалов с поверхностями нагревателя и холодильника;
- 4) измерение малых разностей температур  $\Delta T$  в исследуемом образце.

## Список литературы

1. Кондратьев Г.М. *Теплофизические измерения*. – М.-Л.: Машиз, 1957. – 340 с.
2. Васильев Л.Л., Танаева С.А. *Теплофизические свойства пористых материалов*. – Минск: Наука и техника, 1971. – 268 с.
3. Сергеев О.А., Чечельницкий А.З. *Стационарные сравнительные методы измерения теплопроводности твердых материалов // Исследования в области тепловых измерений: Труды метрологических институтов СССР*. – М.-Л.: Изд-во стандартов, 1969. – Вып. 111 (171). – С. 37-41.
4. *Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. чл.-кор. АН СССР В.А. Григорьева, И. М. Зорина; 2-е изд., перераб.* – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.: *Теплоэнергетика и теплотехника; Кн. 2.*
5. *Руководство по выражению неопределенности измерения: Перевод с англ. / Под науч. ред. проф. В.А. Слаева*. – С.-Пб.: ГП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999. – 340 с.
6. Захаров И. П., Кукуш В. Д. *Теория неопределенностей в измерениях: Учеб. пособие*. – Х.: КОНСУМ, 2002. – 240 с.

Поступила в редколлегию 23.04.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.