

НОВЫЕ СТАЦИОНАРНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В. П. Ходунков¹, Ю. П. Заричняк²

*Информационно аналитический отдел, walkerearth@mail.ru;
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологии им. Д. И. Менделеева» (1), Санкт-Петербург, Россия;
Факультет энергетики и экотехнологий (2),
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики», Санкт-Петербург, Россия*

Ключевые слова: абсолютный метод; дифференциальное сканирование; кондуктометрия; разнородный материал; совокупное измерение; теплопроводность; электротепловая аналогия; эталон.

Аннотация: Рассмотрены два стационарных метода измерения теплопроводности твердых тел и дано их теоретическое обоснование. Показаны принципиальные структурные схемы реализующих их устройств. Выполнена оценка ожидаемой точности, обеспечиваемой данными методами.

Обозначения

N – количество образцов, отн. ед;	x – координата в направлении, нормальном к поперечному сечению образцов, м;
$P_i^{(j)}$ – измеренная мощность i -го внешнего источника в j -м режиме, Вт;	σ – тепловая проводимость i -го образца, Вт/К;
S_i – площадь поперечного сечения i -го образца, м ² ;	λ_i – теплопроводность i -го образца, Вт/(м·К);
T – температура, К;	ΔP – разность электрических мощностей, Вт;
d, d_M – диаметры, м, соответственно образцов и матрицы;	ΔT – перепад температуры, К;
h – высота матрицы, м;	$\Delta T_i^{(j)}$ – измеренный перепад температуры на i -м образце в j -м режиме, К
h_i – толщина i -го образца, м;	
k_1, k_2 – постоянные коэффициенты;	
q – плотность теплового потока, Вт/м ² ;	

Введение

Измерение теплофизических свойств веществ, в том числе теплопроводности, всегда актуально, особенно сейчас, когда активно развиваются новые технологии по созданию композиционных материалов с заранее заданными свойствами, где теплопроводность является одним из важных задаваемых физических параметров. Для современного уровня развития науки и техники в области измерений теплопроводности характерно многообразие методов, о чем свидетельствуют периодически появляющиеся публикации по данной тематике. Для измерений широко используются как стационарные методы [1] так и нестационарные, основанные на регулярном тепловом режиме 1 – 3 рода [2 – 5], теории температурных волн и др. [6]. Все методы обладают определенными достоинствами, недостатками и, в зависимости от условий применения и поставленных задач, могут быть как эффективными, так и наоборот.

Один из недостатков большинства методов заключается в том, что они не являются абсолютными, поэтому для их реализации требуется эталонный образец, теплопроводность которого заранее и точно известна. Это ощутимо увеличивает погрешность измерений. Другой недостаток заключается в ограничении номенклатуры исследуемых материалов и обусловлен требованием близости значений теплопроводности исследуемого и эталонного образцов, поэтому методы зачастую не обеспечивают возможность измерения образцов с сильно отличающимися теплопроводностями. В качестве примера можно привести Государственный эталон единицы теплопроводности ГЭТ 59-2007, который основан на стационарном методе [7], где осуществляется воспроизведение единицы теплопроводности в ограниченных диапазонах, Вт/(м·К), 0,1...5 и 5...20, при этом расширенная относительная неопределенность измерений составляет 0,8 – 2 %.

Рассмотрим два метода, разработанные с целью дальнейшего достижения более высокой точности и расширения диапазонов измеряемой величины [8, 9]. Стационарный абсолютный метод дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии и метод совокупного измерения теплопроводности предназначены для исследований материалов с отличающимися теплопроводностями и, самое главное, не предусматривают использование эталонного образца.

Принцип и схемы измерения

В теоретическую основу обоих методов положено уравнение Фурье, описывающее стационарное одномерное температурное поле в пластине, формирующееся под воздействием проходящего через нее стационарного теплового потока заданной величины.

По своей сути, оба метода построены по одному и тому же принципу, но отличаются лишь количеством образцов, используемых при измерениях. Данное отличие обусловлено степенью различия теплопроводностей исследуемых образцов. Первый метод [8], где используются три образца, предназначен для измерения сильно различающихся теплопроводностей. Второй метод [9], в котором используются два образца, позволяет измерять равные или мало отличающиеся друг от друга теплопроводности. Схемы тепловых ячеек методов представлены на рис. 1; внешний вид исследуемых образцов, используемых в первом методе, – рис. 2.

На рисунках обозначены: 1, 2, 3 – исследуемые образцы; 4 – сток теплоты, который равномерно распределен по плоскости соприкосновения образцов; 5, 6 – источники теплоты (нагревательные элементы), равномерно распределенные по наружным плоскостям исследуемых образцов

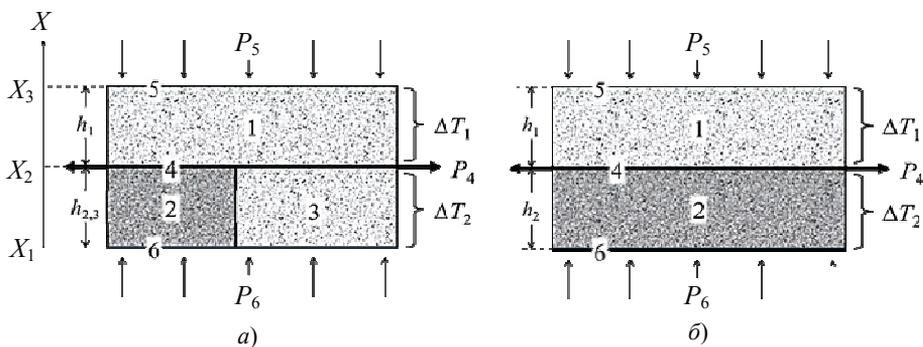


Рис. 1. Схемы тепловых ячеек первого (а) и второго (б) методов

В методе дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии разнородных твердых материалов [8] используют три одинаковых по толщине плоских образца 1, 2, 3, два из которых (1, 3) выполнены из одного и того же материала. В абсолютном методе дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии [9] используют два одинаковых по толщине плоских образца 1, 2.

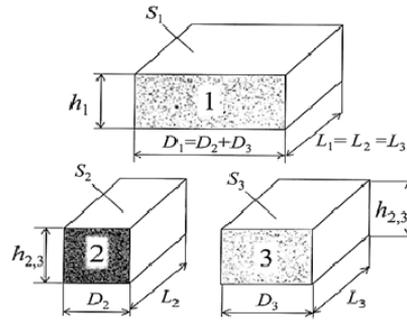


Рис. 2. Внешний вид исследуемых образцов для первого метода

Вывод уравнений измерений методов

В обоих методах измерения выполняются в двух режимах:

– равенства температурных перепадов на исследуемых образцах, то есть $\Delta T_1 = \Delta T_2$;

– равенства плотностей теплового потока через образцы, то есть $P_5 - P_4 = P_6 - P_4$. Это обеспечивает получение двух решаемых относительно теплопроводности уравнений с двумя неизвестными теплопроводностями.

Первый метод. Согласно общей формулировке, краевая задача для измерительной ячейки (см. рис. 1, а) математически записывается следующим образом:

– уравнения теплопроводности, выраженные через тепловые проводимости образца 1 и образцов 2, 3 имеют вид:

$$\begin{cases} P_5 - P_4 = \sigma_1 \Delta T_1 \\ P_6 - P_4 = \sigma_{2-3} \Delta T_{2,3} \end{cases}, \quad (1)$$

– граничные условия 4-го рода:

при $x = x_1$

$$\begin{aligned} P_6/S_1 &= -\lambda_2 dT_2/dx = -\lambda_3 dT_3/dx; \\ T_2(x = x_1) &= T_3(x = x_1) = f(P_6); \end{aligned} \quad (2)$$

$x = x_2$

$$\begin{aligned} P_4/S_1 &= -\lambda_2 dT_2/dx = -\lambda_3 dT_3/dx = -\lambda_1 dT_1/dx; \\ T_2(x = x_2) &= T_3(x = x_2) = T_1(x = x_2) = \text{const}; \end{aligned} \quad (3)$$

$x = x_3$

$$\begin{aligned} P_5/S_1 &= -\lambda_1 dT_1/dx; \\ T_1(x = x_3) &= f(P_5), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\sigma_1 = \lambda_1 S_1 / h_1$ – тепловая проводимость образца 1; $\sigma_{2-3} = (\lambda_2 S_2 + \lambda_3 S_3) / h_{2,3}$ – эффективная тепловая проводимость системы тел «образец 2 – образец 3»; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – теплопроводности образцов 1, 2, 3 соответственно, при этом $\lambda_1 = \lambda_3 > \lambda_2$; S_1, S_2, S_3 – площади поперечного сечения образцов 1, 2, 3 соответственно (см. рис. 2), при этом принимают, что $S_3 = k_1 S_1$, $S_2 = (1 - k_1) S_1$, причем $S_1 = S_2 + S_3$; $h_1, h_{2,3}$ – толщины образцов 1 и 2, 3 соответственно, при этом принимают, что $h_{2,3} = k_2 h_1$.

Для расчета эффективной тепловой проводимости σ_{2-3} системы тел «образец 2 – образец 3» используют так называемую электротепловую аналогию – метод расчета тепловых систем, сводящийся к расчету эквивалентных линейных электриче-

ских схем [10]. Согласно электротепловой аналогии эффективная тепловая проводимость двух параллельно расположенных участков тепловой цепи равна сумме тепловых проводимостей каждого участка. При этом тепловая проводимость каждого участка тепловой цепи прямо пропорциональна его теплопроводности и площади его поперечного сечения и обратно пропорциональна длине данного участка тепловой цепи (толщине $h_{2,3}$ образцов 2, 3). Исходя из этого, получено приведенное выше соотношение для эффективной тепловой проводимости σ_{2-3} системы тел «образец 2 – образец 3».

Габаритные размеры образцов 1, 2, 3 выбирают предварительно, исходя из двух одновременных требований, которые заключаются в том, чтобы:

- измеряемая разность мощностей внешних источников теплоты 5, 6, при которой достигается равенство стационарных перепадов температуры, должна быть достаточной для ее точного измерения;

- стационарный перепад температуры в системе тел «образец 2 – образец 3», достигаемый при равенстве мощностей внешних источников теплоты, должен быть соизмерим с заданным стационарным перепадом температуры на образце 1.

Для этого используют предварительно получаемые расчетные зависимости разности мощностей внешних источников 5, 6 от соотношения толщин образцов 2, 3 и образца 1 для различного соотношения площадей поперечного сечения образцов 2, 3 (рис. 3). На примере осуществления метода показано, как получить указанные зависимости и определить наиболее оптимальные размеры образцов 1, 2, 3.

Метод реализуют на основе уравнений (1) – (4) в два этапа. На первом этапе выполняют компарирование образцов 2, 3 и образца 1 по мощности соответствующих им внешних источников теплоты 6, 5. Для этого при заданной неизменной и стабилизированной во времени мощности P_4 внутреннего стока теплоты 4 путем регулирования мощностей внешних источников теплоты 6, 5 достигают заданного равенства стационарных перепадов температуры $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_{2,3}^{(1)}$ на образце 1 и в системе тел «образец 2 – образец 3». По достижении равенства перепадов измеряют стационарный перепад температуры $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_{2,3}^{(1)}$ и мощности

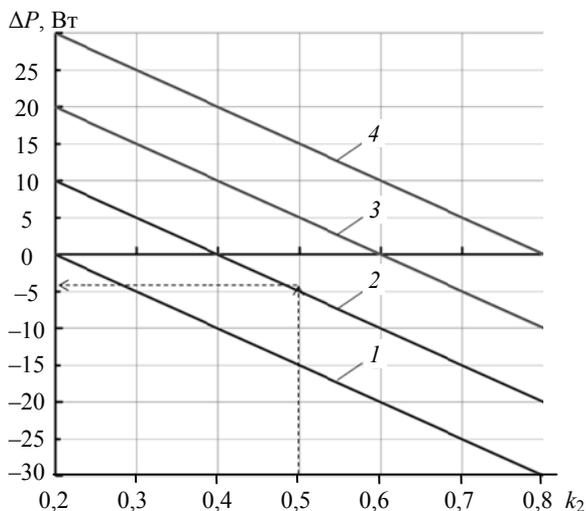


Рис. 3. Расчетные зависимости разности ΔP измеряемых мощностей внешних источников 5, 6 от соотношения толщин образцов 2, 3 и образца 1 при различных соотношениях поперечных сечений образцов 2, 3 при k_1 :

1 – 0,2; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8

внешних источников теплоты $P_6^{(1)}$ и $P_5^{(1)}$. Далее находят разность указанных мощностей, которая, согласно (1), связана с искомыми теплопроводностями следующим соотношением:

$$P_6^{(1)} - P_5^{(1)} = \frac{\Delta T_1^{(1)} S_1 (\lambda_1 (k_1 - k_2) + \lambda_2 (1 - k_1))}{h_1 k_2}. \quad (5)$$

На втором этапе выполняют компарирование образцов 2, 3 и образца 1 по стационарным перепадам температуры на них. Для этого при заданной неизменной и стабилизированной мощности P_4 внутреннего стока теплоты 4, которая использовалась на первом этапе, задают равные мощности внешних источников теплоты, причем делают их равными мощности $P_5^{(1)}$ внешнего источника 5, соприкасающегося с более теплопроводным наибольшим образцом 1. Таким образом, получают равенство мощностей $P_5^{(1)} = P_5^{(2)} = P_6^{(2)}$. Измеряют достигнутый стационарный перепад температуры $\Delta T_1^{(2)}$ на образце 1 и стационарный перепад температуры $\Delta T_{2,3}^{(2)}$ в системе тел «образец 2 – образец 3». Из системы уравнений (1) выражают разность мощностей внешних источников теплоты 6, 5 и приравнивают ее к нулю (так как мощности одинаковые), в результате чего получают уравнение для расчета отношения теплопроводностей λ_2/λ_1 :

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{k_2 \Delta T_1^{(2)} - k_1 \Delta T_{2,3}^{(2)}}{(1 - k_1) \Delta T_{2,3}^{(2)}} = N. \quad (6)$$

Затем совместно решают уравнения (5), (6) относительно теплопроводности λ_1 образца 1, в результате получают систему уравнений измерения метода:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{(P_6^{(1)} - P_5^{(1)}) h_1 k_2}{\Delta T_1^{(1)} S_1 (k_1 - k_2 + N(1 - k_1))}, \quad \lambda_2 = N \lambda_1, \\ N = \frac{k_2 \Delta T_1^{(2)} - k_1 \Delta T_{2,3}^{(2)}}{(1 - k_1) \Delta T_{2,3}^{(2)}}, \quad k_1 = S_3/S_1, \quad k_2 = h_{2,3}/h_1. \end{cases} \quad (7)$$

Пример осуществления первого метода.

Пусть, например, требуется измерить априори неизвестные теплопроводности образцов из стали – образцы 1, 3 с теплопроводностью λ_1 и образца из оргстекла – образец 2 с теплопроводностью λ_2 . Ожидаемо, что значения указанных теплопроводностей существенно различаются: теплопроводность стали намного выше теплопроводности оргстекла $\lambda_1 > \lambda_2$. Формируют измерительную ячейку по схеме (см. рис. 1, а). При этом предварительно определяют оптимальные размеры образцов 1, 2, 3, для чего выполняют расчет зависимостей разности электрических мощностей $\Delta P = P_6^{(1)} - P_5^{(1)}$ от коэффициента $k_2 = h_{2,3}/h_1$ в диапазоне $0 < k_2 < 1,0$ при нескольких разных фиксированных значениях $k_1 = S_3/S_1$, взятого из диапазона $0 < k_1 < 1$. Вид таких зависимостей для рассматриваемого примера представлен на рис. 3. Расчет указанных зависимостей проводят по соотношению (5), в котором используют ожидаемые значения теплопроводностей λ_1 и λ_2 . При этом, например, задают следующие исходные расчетные данные:

- принимают размеры образца 1: $h_1 = 20$ мм, $D_1 = 40$ мм, $L_1 = 40$ мм, площадь поперечного сечения $S_1 = D_1 L_1 = 0,04 \cdot 0,04 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ м²;
- стационарный перепад температуры $\Delta T_1^{(1)} = 10$ К;
- ожидаемое значение теплопроводности образцов 1, 3 – $\lambda_1 \approx 30$ Вт/(м·К);
- ожидаемое значение теплопроводности образца 2 – $\lambda_2 \approx 0,3$ Вт/(м·К);

– ожидаемое отношение теплопроводностей $N = \lambda_2/\lambda_1 \approx 0,01$.

Из указанных зависимостей выбирают такое значение k_2 , при котором разность мощностей ΔP будет достаточной для ее точного измерения, при этом одновременно стационарный перепад температуры в системе тел «образец 2 – образец 3», достигаемый на втором этапе измерения, соизмерим с заданным стационарным перепадом температуры на образце 1.

Например, из полученной зависимости на рис. 3 выбирают значение коэффициента k_2 , равное $k_2 = 0,5$, а значение коэффициента k_1 , равное $k_1 = 0,4$. Выбранным значениям коэффициентов соответствует разность мощностей ΔP внешних источников теплоты, приблизительно равная $\Delta P \approx -4,8$ Вт, что вполне достаточно для ее точного измерения.

Для получения расчетного соотношения для ожидаемого значения перепада температуры используют уравнение из (7)

$$N = \frac{k_2 \Delta T_1^{(2)} - k_1 \Delta T_{2,3}^{(2)}}{(1 - k_1) \Delta T_{2,3}^{(2)}}, \quad (8)$$

в котором принимают равенство перепадов температур $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_1^{(2)}$ (в рассматриваемом примере $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_1^{(2)} = 10$ К). С учетом принятого, из (8) получают оценку ожидаемого перепада температуры

$$\Delta T_{2,3}^{(2)} = \frac{k_2 \Delta T_1^{(1)}}{k_1 + N(1 - k_1)} = \frac{0,5 \cdot 10}{0,4 + 0,01(1 - 0,4)} = 12,5 \text{ К.}$$

Полученное значение стационарного перепада температуры $\Delta T_{2,3}^{(2)}$ близко к стационарному перепаду температуры $\Delta T_1^{(1)} = 10$ К на образце 1, что соответствует сформулированному выше требованию.

Исходя из полученных значений коэффициентов k_1 и k_2 с учетом соотношений (7) задают размеры образцов 2, 3:

– образец 2: $h_{2,3} = k_2 h_1 = 10$ мм, $D_2 = 24$ мм, $L_2 = 40$ мм, площадь поперечного сечения $S_2 = D_2 L_2 = 0,024 \cdot 0,04 = 9,6 \cdot 10^{-4}$ м²;

– образец 3: $h_{2,3} = k_2 h_1 = 10$ мм, $D_3 = 16$ мм, $L_3 = 40$ мм, площадь поперечного сечения $S_3 = k_1 S_2 = D_3 L_3 = 0,016 \cdot 0,04 = 6,4 \cdot 10^{-4}$ м².

Согласно заданным размерам изготавливают образцы 1, 2, 3 и собирают измерительную ячейку (см. рис. 1, а). Затем, согласно первому этапу, выполняют компарирование образцов 2, 3 и образца 1 по мощности соответствующих им внешних источников теплоты 6, 5. В результате получают значения мощностей внешних источников теплоты, например, равные $P_6^{(1)} = 10$ Вт и $P_5^{(1)} = 14,6$ Вт, при которых достигаются одинаковые стационарные перепады температуры образцов 2, 3 и образца 1 $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_1^{(2)} = 10$ К. Затем, согласно второму этапу, выполняют компарирование образцов 2, 3 и образца 1 по их стационарным перепадам температуры. В результате, получают значения достигнутых стационарных перепадов температуры, например, равные $\Delta T_1^{(2)} = 10$ К, $\Delta T_{2,3}^{(2)} = 12,3$ К, которые соответствуют равенству мощностей $P_5^{(1)} = P_6^{(2)} = P_5^{(2)}$.

Далее выполняют расчет искомых теплопроводностей, для чего используют систему уравнений (7), получают следующие значения теплопроводностей, Вт/(м·К): стали $\lambda_1 = 30,68$, оргстекла $\lambda_2 = 0,322$.

Второй метод. Алгоритм вывода уравнения измерения второго метода полностью идентичен первому методу, поэтому в данной статье не приводится. Уравнения измерения второго метода имеют вид:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{(P_5^{(1)} - P_6^{(1)})h_1}{\Delta T_1^{(1)}S(k_1 - N)}, & N = \frac{k_1\Delta T_1^{(2)}}{\Delta T_2^{(2)}}; \\ \lambda_2 = N\lambda_1, & k_1 = h_2/h_1. \end{cases} \quad (9)$$

Пример реализации второго метода.

Пусть, например, требуется измерить априори неизвестные теплопроводности образца из алюминия – образец 1 с теплопроводностью λ_1 и образца из стали – образец 2 с теплопроводностью λ_2 . Ожидаемо, что значения указанных теплопроводностей существенно различаются: теплопроводность алюминия выше теплопроводности стали $\lambda_1 > \lambda_2$. Образцы выполнены в форме параллелепипедов с одинаковым поперечным сечением, но с разной толщиной h . Формируют измерительную ячейку по схеме (см. рис. 1, б). При этом предварительно определяют оптимальные размеры образцов 1, 2, для чего выполняют расчет зависимостей разности электрических мощностей $\Delta P = P_5^{(1)} - P_4^{(1)}$ от коэффициента $k_1 = h_2/h_1$ в диапазоне $0 < k_1 < 1,0$. Вид данной зависимости для рассматриваемого примера представлен на рис. 4. Расчет зависимости проводят по соотношению (10), в котором используют ожидаемые значения теплопроводностей λ_1 и λ_2 . При этом, например, задают следующие исходные расчетные данные:

- принимают размеры образца 1, равные: $h_1 = 20$ мм – толщина образца 1, $D_1 = 40$ мм – ширина образца 1, $L_1 = 40$ мм – длина образца 1, площадь поперечного сечения $S_1 = D_1L_1 = 0,04 \cdot 0,04 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ м²;
- стационарный заданный перепад температуры $\Delta T_1^{(1)} = 10$ К;
- ожидаемые значения теплопроводности, Вт/(м·К), образца 1 – $\lambda_1 \approx 200$ и образца 2 – $\lambda_2 \approx 35$;
- ожидаемое отношение теплопроводностей $N = \lambda_2/\lambda_1 \approx 0,175$.

$$(P_5^{(1)} - P_4^{(1)}) = \frac{\Delta T_1^{(1)}S}{h_1}(k_1\lambda_1 - \lambda_2). \quad (10)$$

По зависимости выбирают такое значение k_1 , при котором разность мощностей ΔP будет достаточной для ее точного измерения, и при этом стационарные перепады температуры на образцах 1, 2 достигаемые при равенстве мощностей внешних источников теплоты, будут соизмеримы и достаточны для их точного измерения, но не будут превышать некоторого заданного значения, заданного эксплуатантом метода (см. рис. 4). Например, выбирают значение коэффициента $k_1 = 0,35$. Выбранному значению коэффициента k_1 соответствует разность мощностей ΔP внешних источников теплоты, приблизительно равная $\Delta P \approx 30$ Вт, что вполне достаточно для ее точного измерения. Для получения расчетного соотношения для ожидаемого значения перепада температуры $\Delta T_2^{(2)}$ используют уравнение из (9):

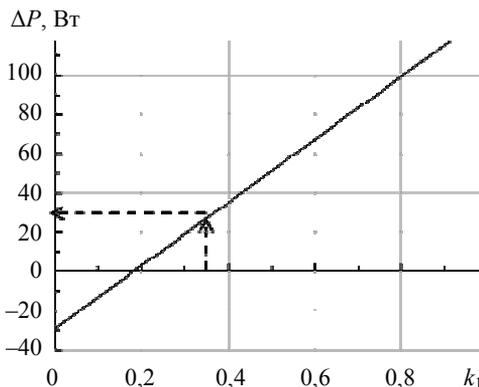


Рис. 4. Пример расчетной зависимости разности мощностей внешних источников теплоты от соотношения толщин образцов

$$N = \frac{k_1 \Delta T_1^{(2)}}{\Delta T_2^{(2)}}, \quad (11)$$

в котором принимают равенство перепадов температур $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)}$ (в рассматриваемом примере $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)} = 10$ К). С учетом принятого, из (11) получают соотношение для оценки ожидаемого перепада температуры $\Delta T_2^{(2)}$

$$\Delta T_2^{(2)} = \frac{k_1 \Delta T_1^{(2)}}{N} = \frac{0,35 \cdot 10}{35/200} = 20 \text{ К.}$$

Полученное значение стационарного перепада температуры $\Delta T_2^{(2)} = 20$ К соизмеримо со стационарным перепадом температуры $\Delta T_1^{(1)} = 10$ К на образце 1, что соответствует сформулированному выше требованию. Исходя из выбранного значения коэффициента k_1 с учетом соотношений (9) задают размер образца 2:

– образец 2: $h_2 = k_1 h_1 = 0,35 \cdot 20 = 7$ мм – толщина образца 2, $D_2 = 40$ мм – ширина образца 2, $L_2 = 40$ мм – длина образца 2, $S_2 = D_2 L_2 = 0,04 \cdot 0,04 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – площадь поперечного сечения.

Согласно заданным размерам изготавливают образцы 1, 2 и собирают измерительную ячейку (см. рис. 1, б). Затем, согласно первому этапу, выполняют компарирование образца 2 и образца 1 по мощности соответствующих им внешних источников теплоты 4, 5, измеряют указанные мощности. В результате получают значения мощностей внешних источников теплоты, Вт, например, $P_5^{(1)} = 45,4$ и $P_4^{(1)} = 14,8$, при которых достигаются одинаковые стационарные перепады температуры $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_1^{(2)} = 10$ К. Затем, согласно второму этапу, выполняют компарирование образца 2 и образца 1 по их стационарным перепадам температуры, которые также измеряют. В результате, получают измеренные значения достигнутых стационарных перепадов температуры, К, например, $\Delta T_1^{(2)} = 10$ и $\Delta T_2^{(2)} = 20,8$, которые соответствуют равенству мощностей $P_5^{(2)} = P_6^{(2)} = P_5^{(1)}$. Далее выполняют расчет искомых теплопроводностей, для чего используют систему уравнений (9), получают следующие значения теплопроводностей, Вт/(м·К): стали – $\lambda_2 = 35,4$; алюминия – $\lambda_1 = 210,5$.

Метод обеспечивает одновременное измерение теплопроводности сразу двух различных по теплофизическим свойствам образцов, то есть обеспечивает операцию кондуктометрического сканирования, что выгодно и существенно отличает его от известных аналогов.

Оценка погрешности методов. Оба метода обеспечивают практически одинаковую точность, поэтому приводится оценка погрешности, выполненная для второго метода.

Наилучшую достижимую относительную погрешность измерения теплопроводности $\delta\lambda$, номинально обеспечиваемую вторым методом, в общем виде оценивают по соотношению

$$\delta\lambda = \left((\delta P_5^{(1)})^2 + (\delta P_4^{(1)})^2 + \delta^2 (\Delta T_1^{(1)}) + \delta^2 (\Delta T_1^{(2)}) + \delta^2 (\Delta T_2^{(2)}) + \delta^2 S + \delta^2 h \right)^{1/2}, \quad (12)$$

где δ – символ, означающий относительную погрешность измерения физической величины.

Основной вклад в погрешность вносит измерение перепада температуры на образцах, остальными составляющими погрешности – погрешностями измерения электрической мощности и размеров образцов можно пренебречь, так как они

не менее чем на порядок ниже погрешности измерения температуры – в настоящее время относительная достигнутая погрешность данных параметров составляет $\delta P_5^{(1)} \approx \delta S \approx \delta h \approx 5 \cdot 10^{-5} = 0,005 \%$. С учетом этого, соотношение (12) правомерно преобразуют к виду

$$\delta \lambda \approx (3\delta^2(\Delta T_1^{(1)}))^{1/2}. \quad (13)$$

Погрешность измерения перепада температуры определяется относительной погрешностью номинальных статических характеристик используемых контактных термопреобразователей. Так, например, для платиновых термометров сопротивления 1-го разряда расширенная абсолютная неопределенность при 0°C составляет $\Delta_1 = 0,002$ К. Для примера зададим значения измеряемых перепадов температуры $\Delta T = \Delta T_1 = 10$ К. Допустим, что каждый из перепадов температуры измеряется с помощью двух термометров сопротивления. С учетом этого, соотношение (13) трансформируется к виду

$$\delta \lambda \approx (6\delta^2(T))^{1/2} = \left(6\delta^2 \left(\frac{\Delta_1}{\Delta T} \right) \right)^{1/2},$$

где $\delta(T) = \Delta_1/\Delta T$ – относительная погрешность измерения температуры поверхности образцов. Для принятых исходных данных $\Delta_1 = 0,002$ К, $\Delta T = \Delta T_1 = 10$ К получаем $\delta \lambda \approx 4,9 \cdot 10^{-4} = 0,049 \%$.

Заключение

При конкретной реализации методов фактическая погрешность будет всегда выше приведенной оценки и в каждом конкретном случае должна определяться индивидуально в зависимости от качества исполнения устройств, реализующих методы.

Методы одновременно измеряют теплопроводности сразу двух различных по теплофизическим свойствам образцов, то есть обеспечивают операцию точного кондуктометрического сканирования, что выгодно и существенно отличает их от известных аналогов.

Список литературы

1. Теплофизические измерения : учеб. пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин ; под ред. Е. С. Платунова. – СПб. : СПбГНИИПТ, 2010. – 738 с.
2. Пономарев, С. В. Устройство для измерения теплофизических свойств веществ методами регулярных режимов / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 1. – С. 6 – 13. doi: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.006-013.
3. Балабанов, П. В. Теоретические и практические аспекты измерения теплофизических свойств гетерогенных материалов : монография / П. В. Балабанов, А. П. Савенков. – Тамбов : ТГТУ, 2016. – 188 с.
4. Пономарев, С. В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография в 2 кн. / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2006. – Кн. 1. – 204 с.
5. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под ред. С. В. Пономарева. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.
6. Пат. 2613194 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Способ измерения теплофизических свойств анизотропных материалов методом линейного импульсного источника теплоты / С. В. Пономарев, О. В. Буланова, А. Г. Дивин, Е. В. Буланов, Г. В. Шишкина ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2015147065 ; заявл. 02.11.2015 ; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 8. – 21 с.

7. Пат. 2276781 Российская Федерация, МПК G01N 25/00. Способ определения теплопроводности материалов / Н. А. Соколов ; заявитель и патентообладатель ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева». – № 2004133748 ; заявл. 16.11.2004 ; опубл. 20.05.2006, Бюл. № 14. – 7 с.

8. Пат. 2749642 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Абсолютный способ дифференциально-сканирующей кондуктометрии разнородных твердых материалов / В. П. Ходунков, Ю. П. Заричняк ; заявитель и патентообладатель ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева». – № 2020138458 ; заявл. 23.11.2020 ; опубл. 16.06.2021, Бюл. № 17. – 17 с.

9. Пат. 2755090 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Абсолютный способ дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии / В. П. Ходунков, Ю. П. Заричняк ; заявитель и патентообладатель ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева». – № 2020138452 ; заявл. 23.11.2020 ; опубл. 13.09.2021, Бюл. № 26. – 15 с.

10. Фокин, В. М. Основы технической теплофизики / В. М. Фокин, Г. П. Бойков, Ю. В. Видин. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 172 с.

New Stationary Methods for Measuring the Thermal Conductivity of Solids

V. P. Khodunkov¹, Yu. P. Zarichnyak²

Information and Analytical Department, walkerearth@mail.ru;

D. I. Mendeleev All-Russian Research Institute of Metrology (1),

St. Petersburg, Russia;

Faculty of Energy and Environmental Technologies (2), National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia

Keywords: absolute method; differential scanning; conductometry; heterogeneous material; aggregate measurement; thermal conductivity; electrothermal analogy; reference.

Abstract: Two stationary methods for measuring the thermal conductivity of solids are considered and their theoretical justification is given. The principal block diagrams of the devices realizing them are shown. The expected accuracy provided by these methods is estimated.

References

1. Platunov Ye.S. [Ed.], Baranov I.V., Buravoy S.Ye., Kurepin V.V. *Teplofizicheskiye izmereniya: uchebnoye posobiye* [Thermophysical measurements: textbook], St. Petersburg: SPbGUNIPT, 2010, 738 p. (In Russ.)

2. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V. [Device for measuring the thermophysical properties of substances by regular regimes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 6-13, doi: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.006-013. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Balabanov P.V., Savenkov A.P. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty izmereniya teplofizicheskikh svoystv geterogennykh materialov: monografiya* [Theoretical and practical aspects of measuring the thermophysical properties of heterogeneous materials: monograph], Tambov: TGTU, 2016, 188 p. (In Russ.)

4. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Divin A.G. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty teplofizicheskikh izmereniy: monografiya v 2 kn.* [Theoretical and practical aspects of thermophysical measurements: monograph in 2 books], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2006, Book 1, 204 p. (In Russ.)

5. Ponomarev S.V. [Ed.] *Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy teplofizicheskikh izmereniy* [Theoretical and practical foundations of thermophysical measurements], Moscow: FIZMATLIT, 2008, 408 p. (In Russ.)

6. Ponomarev S.V., Bulanova O.V., Divin A.G., Bulanov Ye.V., Shishkina G.V. *Sposob izmereniya teplofizicheskikh svoystv anizotropnykh materialov metodom lineynogo impul'snogo istochnika teploty* [Method for measuring the thermophysical properties of anisotropic materials by the method of a linear pulsed heat source], Russian Federation, 2017, Pat. 2613194. (In Russ.)

7. Sokolov N.A. *Sposob opredeleniya teploprovodnosti materialov* [A method for determining the thermal conductivity of materials], Russian Federation, 2006, Pat. 2276781. (In Russ.)

8. Khodunkov V.P., Zarichnyak Yu.P. *Absolyutnyy sposob differentsial'no-skanniruyushchey konduktometrii raznorodnykh tverdykh materialov* [Absolute method of differential-scanning conductometry of heterogeneous solid materials], Russian Federation, 2021, Pat. 2749642. (In Russ.)

9. Khodunkov V.P., Zarichnyak Yu.P. *Absolyutnyy sposob differentsial'no-skanniruyushchey teplovoy konduktometrii* [Absolute method of differential-scanning thermal conductometry], Russian Federation, 2021, Pat. 2755090. (In Russ.)

10. Fokin V.M., Boykov G.P., Vidin Yu.V. *Osnovy tekhnicheskoy teplofiziki* [Fundamentals of technical thermophysics], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004, 172 p. (In Russ.)

Neue stationäre Messverfahren der Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern

Zusammenfassung: Es sind zwei stationäre Methoden zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern betrachtet und ihre theoretische Begründung ist gegeben. Die prinzipiellen Blockdiagramme der Geräte, die sie implementieren, sind gezeigt. Die erwartete Genauigkeit dieser Methoden ist ausgewertet.

Nouvelles méthodes stationnaires de la mesure de la conductivité thermique des solides

Résumé: Sont examinées deux méthodes stationnaires de la mesure de la conductivité thermique des solides théorique, est donnée leur justification. Sont montrés les schémas structurels du principe des dispositifs qui les réalisent. Est évaluée la précision attendue fournie par ces méthodes.

Авторы: *Ходунков Вячеслав Петрович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, аналитик, Информационно-аналитический отдел, отдел эталонов и научных исследований в области термодинамики, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия; *Заричняк Юрий Петрович* – доктор физико-математических наук, профессор, доцент факультета энергетики и экотехнологий, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», Санкт-Петербург, Россия.