

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

## HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

---

УДК 621.326.7  
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-668-676

### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В. П. ХОДУНКОВ<sup>1\*</sup>, Ю. П. ЗАРИЧНЯК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,  
Санкт-Петербург, Россия  
\*walkerearth@mail.ru*

<sup>2</sup> *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Рассматриваются два новых метода измерения теплопроводности твердых тел, базирующиеся на использовании абсолютного и относительного измерений исходных тепловых величин, определяющих значение измеряемого параметра. В представленных методах максимально снижено влияние традиционных негативных факторов техники эксперимента на точность получаемых результатов.

**Ключевые слова:** метод измерения, теплопроводность, электротепловая аналогия, тепловая проводимость, абсолютное измерение, точность, эталон

**Ссылка для цитирования:** Ходунков В. П., Заричняк Ю. П. Перспективные методы измерения теплопроводности твердых тел // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 668—676. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-668-676.

### PROMISING METHODS FOR MEASURING THE THERMAL CONDUCTIVITY OF SOLIDS

V. P. Khodunkov<sup>1\*</sup>, Yu. P. Zarichnyak<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology,  
St. Petersburg, Russia  
\*walkerearth@mail.ru*

<sup>2</sup> *ITMO University, St. Petersburg, Russia*

**Abstract.** Two new methods of measuring the thermal conductivity of solids are considered, based on the use of absolute and relative measurements of the initial thermal quantities that determine the value of the measured parameter. In the presented methods, the influence of traditional negative factors of experimental technique on the accuracy of the results obtained is maximally reduced.

**Keywords:** measurement method, thermal conductivity, electrothermal analogy, thermal conductivity, absolute measurement, accuracy, standard

**For citation:** Khodunkov V. P., Zarichnyak Yu. P. Promising methods for measuring the thermal conductivity of solids. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 668—676 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-668-676.

**Введение.** Представлены два из четырех новых перспективных методов измерения теплопроводности твердых тел, разработанных авторами настоящей статьи в целях значительно повышения точности с одновременным расширением динамических диапазонов по изме-

ряемой величине [1—4]. При разработке методов были учтены опыт и достижения науки в данной области измерений, которые наиболее полно представлены в работах [5—10].

**Первый метод** — абсолютный метод дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии [1]. Предложенный метод, предназначенный для одновременного измерения теплопроводности двух разнородных твердых тел, является стационарным абсолютным методом и не требует наличия эталонного образца, теплопроводность которого заранее и точно известна.

Сущность метода поясняется рис. 1, 2: на рис. 1 представлена тепловая схема измерительной ячейки, реализующей метод, на рис. 2 — пример расчетной зависимости разности мощностей внешних источников теплоты от соотношения толщин образцов, которая используется для определения оптимальных размеров образцов.

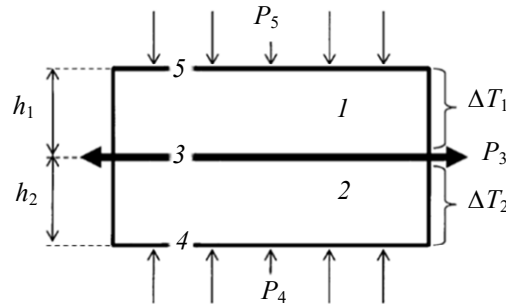


Рис. 1

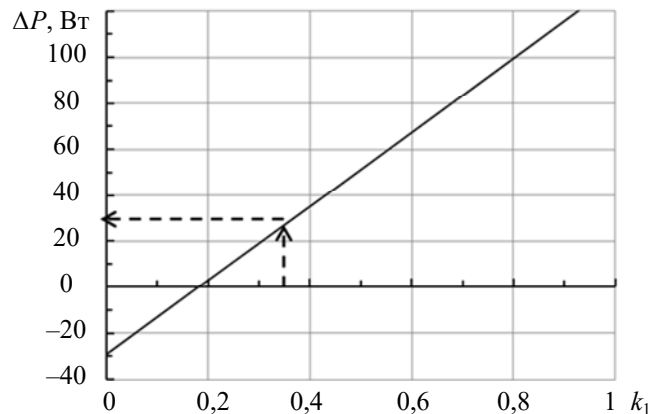


Рис. 2

Измерительная ячейка (см. рис. 1) содержит: 1, 2 — исследуемые образцы, 3 — внутренний сток теплоты, 4, 5 — внешние источники теплоты.

В теоретическую основу метода положена краевая задача теплопроводности для теплообмена двух соприкасающихся тел по закону теплопроводности Фурье с граничными условиями 4-го рода в одномерной постановке:

— уравнение теплопроводности для каждого из тел:

$$q_1 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}; \quad q_2 = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}; \quad (1)$$

— граничные условия 4-го рода в плоскости соприкосновения образцов с внутренним стоком теплоты:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_2 = T_3; \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  — теплопроводность образцов 1, 2 соответственно;  $T_1, T_2$  — среднеповерхностные температуры образцов 1, 2 в плоскости соприкосновения с внутренним стоком теплоты 3;  $T_3$  — среднеповерхностная температура в плоскости соприкосновения образцов;  $q_1, q_2$  —

стационарный тепловой поток в образцах 1, 2 соответственно;  $x$  — координата вдоль толщины образцов.

Уравнения (1), выраженные через тепловые проводимости образцов, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= (P_3 - P_5)/S = \sigma_1 \Delta T_1 / S; \\ q_2 &= (P_4 - P_3)/S = \sigma_2 \Delta T_2 / S, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $P_5, P_4$  — мощности внешних источников теплоты 5, 4 соответственно;  $P_3$  — мощность внутреннего стока теплоты 3;  $\sigma_1 = \lambda_1 S / h_1$  — тепловая проводимость образца 1;  $\sigma_2 = \lambda_2 S / h_2$  — тепловая проводимость образца 2;  $S$  — площадь поперечного сечения образцов 1, 2;  $h_1, h_2$  — толщины образцов 1, 2 соответственно (при этом принимается, что  $h_2 = k_1 h_1$ , где  $k_1$  — постоянный коэффициент);  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  — стационарный перепад температуры на образцах 1 и 2 соответственно.

Габаритные размеры образцов 1, 2 выбираются предварительно на основе двух следующих требований:

— разность мощностей внешних источников теплоты 5, 4, при которой достигается равенство стационарных перепадов температуры на образцах 1, 2, должна быть достаточной для ее точного измерения,

— стационарные перепады температуры на образцах 1, 2, достигаемые при равенстве мощностей внешних источников теплоты, должны быть соизмеримы и достаточны для точного измерения, но не должны превышать некоего заданного значения, которое определяется индивидуально; под неким заданным значением перепада температуры понимается такой перепад, в пределах которого фактически происходит осреднение измеряемых значений теплопроводностей.

Для выполнения данных требований используют предварительно получаемые расчетные зависимости разности мощностей внешних источников 5, 4 от соотношения толщин образцов 1, 2, как это показано на рис. 2.

Метод реализуется в два этапа на основе системы уравнений измерения:

$$\lambda_1 = \frac{(P_5^{(1)} - P_4^{(1)}) h_1}{\Delta T_1^{(1)} S (k_1 - N)}; \quad N = \frac{k_1 \Delta T_1^{(2)}}{\Delta T_2^{(2)}}; \quad \lambda_2 = N \lambda_1; \quad k_1 = h_2 / h_1. \quad (4)$$

Вывод уравнений (4) подробно представлен в работе [1], поэтому здесь не приводится.

На первом этапе выполняют компарирование образцов 1, 2 по мощности соответствующих им внешних источников теплоты 5, 4. Для этого при заданной неизменной и стабилизированной во времени мощности  $P_3$  внутреннего стока теплоты 3 путем регулирования мощностей внешних источников теплоты 5, 4 достигают заданного равенства стационарных перепадов температуры  $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)}$  на образцах 1 и 2 соответственно. При достижении равенства перепадов измеряют стационарные перепады температуры  $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)}$  и соответствующие им мощности внешних источников теплоты  $P_5^{(1)}$  и  $P_4^{(1)}$ . Далее вычисляют разность указанных мощностей, которая, согласно системе уравнений (3), (4), связана с искомыми теплопроводностями следующим соотношением:

$$P_5^{(1)} - P_4^{(1)} = \frac{\Delta T_1^{(1)} S}{h_1} (k_1 \lambda_1 - \lambda_2). \quad (5)$$

На втором этапе выполняют компарирование образцов 1, 2 по стационарным перепадам температуры на них. Для этого при заданной неизменной и стабилизированной мощности  $P_3$  внутреннего стока теплоты 3, которая использовалась на первом этапе, задают равные мощности внешних источников теплоты, например, приравнивают их к мощности одного из внешних источников, установленной на первом этапе измерений, к примеру мощности  $P_5^{(1)}$  внешнего источника 5. Таким образом, получают равенство мощностей  $P_5^{(2)} = P_4^{(2)} = P_5^{(1)}$ . Далее

измеряют достигнутый стационарный перепад температуры  $\Delta T_1^{(2)}$  на образце 1 и стационарный перепад температуры  $\Delta T_2^{(2)}$  на образце 2. Из системы уравнений (3), (4) выражают разность мощностей внешних источников теплоты 5, 4 и приравнивают ее нулю (так как мощности одинаковые), в результате чего получают уравнение для расчета соотношения теплопроводностей  $\lambda_2/\lambda_1$ :

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{k_1 \Delta T_1^{(2)}}{\Delta T_2^{(2)}} = N. \quad (6)$$

Затем совместно решают уравнения (6), (5) относительно теплопроводности  $\lambda_1$  образца 1, после находят теплопроводность  $\lambda_2$  образца 2.

**Пример реализации первого метода.** Пусть, например, требуется измерить априори неизвестные теплопроводности образца из алюминия (образец 1 с теплопроводностью  $\lambda_1$ ) и образца из стали (образец 2 с теплопроводностью  $\lambda_2$ ). Ожидаемо, что значения указанных теплопроводностей существенно различаются — теплопроводность алюминия выше теплопроводности стали:  $\lambda_1 > \lambda_2$ . Образцы выполнены в форме параллелепипедов с одинаковыми размерами поперечного сечения, но с разной толщиной  $h$ . Формируют измерительную ячейку по схеме, как показано на рис. 1. 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. 2. Для расчета используют соотношение (5) с ожидаемыми значениями теплопроводностей  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . При этом, например, задают следующие исходные расчетные данные:

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

В результате расчета по соотношению (5) получают зависимость (см. рис.2), из которой выбирают значение  $k_1$ , при котором разность мощностей  $\Delta P$  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 (в пределах одного порядка) и достаточны для их точного измерения, но не будут превышать некоторого заданного значения.

Следует заметить, что диапазон выбираемых значений  $k_1$  достаточно широк, главное требование при выборе конкретного значения  $k_1$  — разность мощностей  $\Delta P$  должна быть достаточной для ее точного измерения.

Например, из полученной зависимости (см. рис. 2) выбирают значение коэффициента  $k_1 = 0,35$ . Этому значению  $k_1$  соответствует разность мощностей  $\Delta P \approx 30$  Вт, что вполне достаточно для ее точного измерения. Для получения расчетного соотношения для ожидаемого значения перепада температуры  $\Delta T_2^{(2)}$  используют уравнение (6), в котором принимают равенство перепадов температуры  $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)}$  (в рассматриваемом примере  $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_2^{(1)} = 10$  К):

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

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

Необходимо отметить, что на практике иногда не представляется возможным оценить даже ожидаемые значения теплопроводностей. В данной ситуации имеются два варианта решения проблемы:

— первый вариант — оценить значения теплопроводностей образцов экспериментально одним из наиболее простых известных методов, при этом не требуется особой точности измерений, после чего рассчитать необходимую толщину образцов и реализовать предлагаемый метод;

— второй вариант — выполнить предварительный эксперимент согласно представленному методу, при этом взять образцы одинаковой толщины, после чего, исходя из экспериментальных данных, скорректировать размеры образцов до нужных толщин, при которых будут обеспечены требуемые значения разности мощностей и перепадов температуры.

После определения необходимой толщины образцов изготавливают образцы 1, 2 и собирают измерительную ячейку, как показано на рис. 1. Затем, согласно первому этапу, выполняют компарирование образцов 2 и 1 по мощности соответствующих им внешних источников теплоты 4, 5, указанные мощности измеряют. В результате получают значения, например,  $P_5^{(1)} = 45,4$  Вт и  $P_4^{(1)} = 14,8$  Вт, при которых достигаются одинаковые стационарные перепады температуры  $\Delta T_1^{(1)} = \Delta T_1^{(2)} = 10$  К. Затем, согласно второму этапу, выполняют компарирование образцов 2 и 1 по их стационарным перепадам температуры, которые также измеряют. В результате получают измеренные значения, например,  $\Delta T_1^{(2)} = 10$  К и  $\Delta T_2^{(2)} = 20,8$  К, которые соответствуют равенству мощностей  $P_5^{(2)} = P_4^{(2)} = P_5^{(1)}$ . Далее выполняют расчет искомых теплопроводностей, для чего используют систему уравнений (4):

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{(P_5^{(1)} - P_4^{(1)}) h_1}{\Delta T_1^{(1)} S (k_1 - N)} = \frac{(45,4 - 14,8) 0,02}{10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} (0,35 - 0,1683)} = 210; \\ N &= \frac{k_1 \Delta T_1^{(2)}}{\Delta T_2^{(2)}} = \frac{0,35 \cdot 10}{20,8} \approx 0,17; \\ \lambda_2 &= N \lambda_1 = 0,1683 \cdot 210,5 = 35,4, \\ k_1 &= h_2 / h_1 = 0,35. \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, согласно предложенному методу измерены следующие значения теплопроводностей: теплопроводность стали —  $\lambda_2 = 35,4$  Вт/(м·К), теплопроводность алюминия —  $\lambda_1 = 210$  Вт/(м·К).

Метод позволяет одновременно измерять теплопроводность сразу двух различных по теплофизическим свойствам образцов, т.е. обеспечивает операцию кондуктометрического сканирования, что выгодно и существенно отличает его от известных методов.

**Оценка погрешности первого метода.** Наилучшую достижимую относительную погрешность измерения теплопроводности  $\delta\lambda$ , номинально обеспечиваемую предложенным методом, в общем виде оценивают по соотношению

$$\delta\lambda = \left( \left( \delta P_5^{(1)} \right)^2 + \left( \delta P_4^{(1)} \right)^2 + \delta^2 \left( \Delta T_1^{(1)} \right) + \delta^2 \left( \Delta T_1^{(2)} \right) + \delta^2 \left( \Delta T_2^{(2)} \right) + \delta^2 S + \delta^2 h \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где  $\delta$  — символ, означающий относительную погрешность измерения физической величины.

Основной вклад в погрешность вносит измерение перепада температуры на образцах, остальные составляющие — погрешности измерения электрической мощности и размеров образцов — пренебрежимо малы (не менее чем на порядок меньше погрешности измерения температуры). В настоящее время относительная достигнутая погрешность данных парамет-

ров составляет  $\delta P_5^{(1)} \approx \delta S \approx \delta h \approx 5 \cdot 10^{-5} = 0,005 \%$ . С учетом этого соотношение (7) преобразуется к виду

$$\delta \lambda \approx (3\delta^2(\Delta T_1^{(1)}))^{1/2}. \quad (8)$$

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  $0^\circ\text{C}$  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 (8) трансформируется к виду

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

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  $\delta \lambda \approx 5 \cdot 10^{-4} = 0,05 \%$ .

Безусловно, при конкретной реализации метода фактическая погрешность будет всегда выше приведенной оценки и в каждом отдельном случае должна определяться индивидуально в зависимости от качества исполнения используемого устройства.

**Второй метод** — относительный метод измерения теплопроводности [2] является частным случаем первого метода и предназначен для дифференциально-сканирующей кондуктометрии, т.е. для измерений теплопроводности твердых тел путем их компарирования с мерой, теплопроводность которой заранее точно известна. Метод ориентирован на применение в метрологии и может быть использован в государственной поверочной схеме средств измерений теплопроводности твердых тел.

Назначение данного метода — обеспечение возможности компарирования теплопроводностей двух материалов с высокой точностью и в широком динамическом диапазоне.

Сущность метода поясняется рис. 3, на котором представлена принципиальная схема измерений, осуществляемых при компарировании теплопроводностей исследуемого и эталонного образцов: 1 — эталонный образец, 2 — исследуемый образец, 3 — охлаждаемое основание, 4, 5 — нагревательные элементы, 6, 7 — теплоизоляционные пластины; стрелками показано направление теплового потока через образцы 1, 2 и в охлаждаемом основании 3.

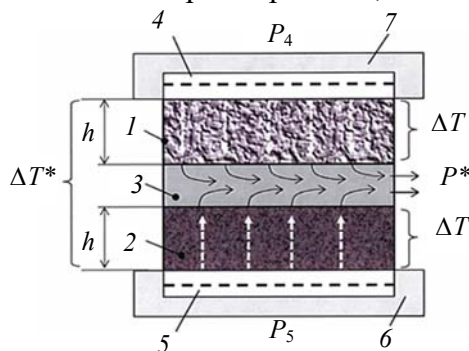


Рис. 3

При компарировании теплопроводностей используют два плоских образца 1, 2 с идентичными габаритными размерами и заданной формой, например два цилиндра или два параллелепипеда. При этом теплопроводность эталонного образца 1, или меры теплопроводности, известна с высокой (эталонной) точностью, а теплопроводность исследуемого образца 2 априори неизвестна. Данные образцы устанавливают на охлаждаемое основание 3 с двух его противоположных сторон, а на внешних плоскостях образцов устанавливают нагревательные элементы 4 и 5 соответственно.

Нагревательные элементы 4, 5 представляют собой пластины с встроенными в них электрическими нагревателями. Охлаждаемое основание 3 и нагревательные элементы 4, 5 выполняют из высокотеплопроводного материала, например из меди, что необходимо для обеспечения наиболее равномерного температурного поля в наружных плоскостях образцов. Кроме того, наружные части каждого из нагревательных элементов 4, 5, не соприкасающиеся с образцами, наилучшим образом теплоизолируют от окружающей среды с помощью теплоизоляционных пластин 6, 7. Это необходимо для того, чтобы вся выделяющаяся в нагревательном элементе электрическая мощность без каких-либо потерь передавалась к образцу. При этом сводят к минимуму контактное тепловое сопротивление между образцами 1, 2 и охлаждающим основанием 3, между образцами 1, 2 и соответствующими им нагревательными элементами 4, 5.

Таким образом, в результате выполнения указанных операций формируется измерительная ячейка для компарирования теплопроводностей двух образцов. Далее задается некое значение стационарного перепада температуры  $\Delta T$ , которого необходимо достичь на толщине  $h$  каждого из образцов 1, 2 (см. рис. 3). При фиксированной стабилизированной мощности охлаждения  $P^*$  путем регулирования электрических мощностей  $P_4, P_5$  достигают одинаковых стационарных перепадов температуры  $\Delta T$  на образцах. В этом случае соотношения, связывающие электрическую мощность нагревательного элемента с теплопроводностью соответствующего образца и с перепадом температуры на нем, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} P_4 &= \sigma_1 \Delta T = \lambda_1 S \Delta T / h; \\ P_5 &= \sigma_2 \Delta T = \lambda_2 S \Delta T / h; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — теплопроводность эталонного и исследуемого образцов соответственно;  $S$  — площадь торцевой поверхности (плоскости контакта) образцов 1, 2;  $\lambda_1 S / h = \sigma_1$  — тепловая проводимость эталонного образца 1;  $\lambda_2 S / h = \sigma_2$  — тепловая проводимость исследуемого образца 2;  $P_4$  — электрическая мощность нагревательного элемента 4, состыкованного с эталонным образцом 1;  $P_5$  — электрическая мощность нагревательного элемента 5, состыкованного с исследуемым образцом 2.

Из системы уравнений (9) следует, что отношение теплопроводностей образцов  $\lambda_1 / \lambda_2$  прямо пропорционально отношению соответствующих им электрических мощностей нагревательных элементов, т.е.  $\lambda_1 / \lambda_2 = P_4 / P_5$ . Отсюда следует, что теплопроводность исследуемого образца может быть определена по соотношению

$$\lambda_2 = \lambda_1 P_5 / P_4,$$

которое является уравнением измерения.

**Оценка неопределенности второго метода.** Оценка выполнена аналогично первому методу и дает значение 0,02 %. Предложенный метод минимизирует количество нежелательных контактных тепловых сопротивлений, количество применяемых средств измерений температуры, длительность измерений и обработки получаемых результатов, обеспечивает высокую точность, прост в реализации и использовании, чем выгодно отличается от известных методов.

**Заключение.** Представлен новый абсолютный метод дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии, который обеспечивает одновременное измерение теплопроводности сразу двух различных по теплофизическим свойствам образцов, т.е. обеспечивает операцию кондуктометрического сканирования, что выгодно и существенно отличает его от известных методов. В методе используется система из двух измеряемых тел. Оцениваемая погрешность метода  $\approx 0,05$  %.

Разработан новый относительный метод измерения теплопроводности, который предназначен для дифференциально-сканирующей кондуктометрии — для измерений теплопроводности твердых тел путем их компарирования с мерой теплопроводности. Метод ориентирован на при-

менение в метрологии и может быть использован в государственной поверочной схеме средств измерений теплопроводности твердых тел. Оцениваемая погрешность метода  $\approx 0,02\%$ .

Представленные методы, по мнению авторов, имеют высокий потенциал для реализации и могут быть успешно использованы при создании новых высокоточных средств измерения теплопроводности. Данные методы взаиморавноправны по применению и обеспечиваемой ими точности, какой метод использовать предпочтительнее — определяет пользователь с учетом специфики условий и задач измерения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2755090 РФ, МПК G01N 25/18. Абсолютный способ дифференциально-сканирующей тепловой кондуктометрии / В. П. Ходунков, Ю. П. Заричняк. Оpubл. 15.09.2021. Бюл. № 26.
2. Пат. 2755330 РФ, МПК G01N 25/18. Способ измерения теплопроводности / В. П. Ходунков. Оpubл. 15.09.2021. Бюл. № 26.
3. Пат. 2749642 РФ, МПК G01N 25/18. Абсолютный способ дифференциально-сканирующей кондуктометрии разнородных твердых материалов / В. П. Ходунков, Ю. П. Заричняк. Оpubл. 16.06.2021. Бюл. № 17.
4. Пат. 2752398 РФ, МПК G01N 25/18. Способ совокупного измерения теплопроводности разнородных твердых материалов и устройство для его осуществления / В. П. Ходунков. Оpubл. 27.07.2021. Бюл. № 21.
5. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. Л.: Машгиз, 1957. 244 с.
6. Балабанов П. В., Савенков А. П. Теоретические и практические аспекты измерения теплофизических свойств гетерогенных материалов: Монография. Тамбов: ТГТУ, 2016. 188 с.
7. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений: Монография / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. Тамбов: ТГТУ, 2006. Кн. 1. 204 с.
8. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под ред. С. В. Пономарева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 408 с.
9. Теплофизические измерения: учеб. пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин; под ред. Е. С. Платунова. СПб: СПбГУН и ПТ, 2010. 738 с.
10. Фокин В. М., Бойков Г. П., Видин Ю. В. Основы технической теплофизики. М.: Машиностроение, 2004. 172 с.

#### Сведения об авторах

**Вячеслав Петрович Ходунков**

— канд. техн. наук; Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, информационно-аналитический отдел, отдел эталонов и научных исследований в области термодинамики; ст. научный сотрудник, E-mail: walkerearth@mail.ru

**Юрий Петрович Заричняк**

— д-р физ.-мат. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет энергетики и экотехнологий; E-mail: zarich@ifmo.ru

Поступила в редакцию 31.05.2022; одобрена после рецензирования 29.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

#### REFERENCES

1. Patent RU 2755090, G01N 25/18, *Absolyutnyy sposob differentsial'no-skaniruyushchey teplovoy konduktometrii* (Absolute Method of Differential Scanning Thermal Conductometry), V.P. Khodunkov, Yu.P. Zarichnyak, Patent application no. 2020138452, Priority 23.11.2020, Published 15.09.2021, Bulletin 26. (in Russ.)
2. Patent RU 2755330, G01N 25/18, *Sposob izmereniya teploprovodnosti* (Method for Measuring Thermal Conductivity), V.P. Khodunkov, Patent application no. 2020138455, Priority 23.11.2020, Published 15.09.2021, Bulletin 26. (in Russ.)
3. Patent RU 2749642, G01N 25/18, *Absolyutnyy sposob differentsial'no-skaniruyushchey konduktometrii raznorodnykh tverdykh materialov* (Absolute Method of Differential Scanning Conductometry of Dissimilar Solid Materials), V.P. Khodunkov, Yu.P. Zarichnyak, Patent application no. 2020138458, Priority 23.11.2020, Published 16.06.2021, Bulletin 7. (in Russ.)
4. Patent RU 2752398, G01N 25/18, *Sposob sovokupnogo izmereniya teploprovodnosti raznorodnykh tverdykh materialov i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* (Method for the Combined Measurement of Thermal Conductivity of Dissimilar Solid Materials and a Device for Its Implementation), V.P. Khodunkov, Patent application no. 2020138460, Priority 23.11.2020, Published 27.07.2021, Bulletin 21. (in Russ.)

5. Kondrat'yev G.M. *Teplovyye izmereniya* (Thermal Measurements), Leningrad, 1957, 244 p. (in Russ.)
6. Balabanov P.V., Savenkov A.P. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty izmereniya teplofizicheskikh svoystv heterogennykh materialov* (Theoretical and Practical Aspects of Measuring the Thermophysical Properties of Heterogeneous Materials), Tambov, 2016, 188 p. (in Russ.)
7. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Divin A.G. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty teplofizicheskikh izmereniy* (Theoretical and Practical Aspects of Thermophysical Measurements), Tambov, 2006, Book 1, 204 p. (in Russ.)
8. Ponomarev S.V., ed., *Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy teplofizicheskikh izmereniy* (Theoretical and Practical Foundations of Thermophysical Measurements), Moscow, 2008, 408 p. (in Russ.)
9. Platunov E.S., Baranov I.V., Buravoy S.E., Kurepin V.V. *Teplofizicheskiye izmereniya* (Thermophysical Measurements), St. Petersburg, 2010, 738 p. (in Russ.)
10. Fokin V.M., Boykov G.P., Vidin Yu.V. *Osnovy tekhnicheskoy teplofiziki* (Fundamentals of Technical Thermophysics), Moscow, 2004, 172 p. (in Russ.)

**Data on authors**

- |                                |   |                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Vyacheslav P. Khodunkov</b> | — | PhD; D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Information and Analytical Department, Department of Standards and Research in the Field of Infrared Radiometry and Applied Pyrometry; Senior Researcher,<br>E-mail: walkerearth@mail.ru |
| <b>Yuriy P. Zarichnyak</b>     | — | Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Energy and Ecotechnology;<br>E-mail: zarich@grv.ifmo.ru                                                                                                                                           |

Received 31.05.2022; approved after reviewing 29.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.