

О РЕАЛИЗУЕМОСТИ МНОГОЗНАЧНЫХ МЕР ТЕПЛОВЫХ ВЕЛИЧИН В МЕТРОЛОГИИ

Ю. П. ЗАРИЧНЯК¹, В. П. ХОДУНКОВ²

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
190005, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: walkerearth@mail.ru

Выполнен анализ нового класса измерений тепловых величин, базирующегося на применении многозначных мер. На примере измерения теплопроводности твердых тел показана ошибочность ранее предложенного подхода и неправомерность использования принципа многозначности для мер интенсивных теплофизических величин. Доказано несоответствие заявленных метрологических характеристик реально достижимым значениям.

Ключевые слова: мера, многозначность, интенсивные тепловые величины, измерение, теплопроводность, удельная теплоемкость, метрология, точность

Обеспечение принципа единства измерений физических величин с одновременным повышением точности является одним из приоритетных направлений в современной метрологии. Это естественным образом подразумевает развитие новых методов и средств измерений, включая разработку новых мер физических величин. Следуя данному направлению, в области измерений теплофизических свойств веществ в последнее время рядом ученых активно продвигается идеология нового класса измерений, основанного на применении так называемых многозначных мер, в частности многозначных мер удельной теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности твердых тел [1—4]. Само по себе, понятие многозначной меры не ново и закреплено на законодательном уровне*, однако по отношению к указанным теплофизическим величинам это, безусловно, принципиально новый подход, который требует тщательного анализа. Суть предложенного подхода заключается в отказе от традиционных однозначных мер и переходе к многозначным мерам с управляемыми внутренними источниками теплоты, которые, в зависимости от их мощности, определяют конкретное теплофизическое свойство [2]. Таким образом, как предполагается, многозначная мера воспроизводит любое априори заданное значение выбранного теплофизического свойства.

Заявленная идеология, по мнению авторов настоящей статьи, вступает в противоречие с существующими научными представлениями в физике твердого тела [5]. Ранее в работе [6] была показана несостоятельность применения многозначной меры по отношению такой к физической величине, как удельная теплоемкость. Далее представлен анализ правомерности применения многозначной меры по отношению к другой физической величине — теплопроводности.

* РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 2000. 46 с.

В рекомендациях Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации* закреплены следующие определения мер физических величин:

однозначная мера — это мера, воспроизводящая физическую величину одного размера;

многозначная мера — это мера, воспроизводящая физическую величину разных размеров (например, штриховая мера длины).

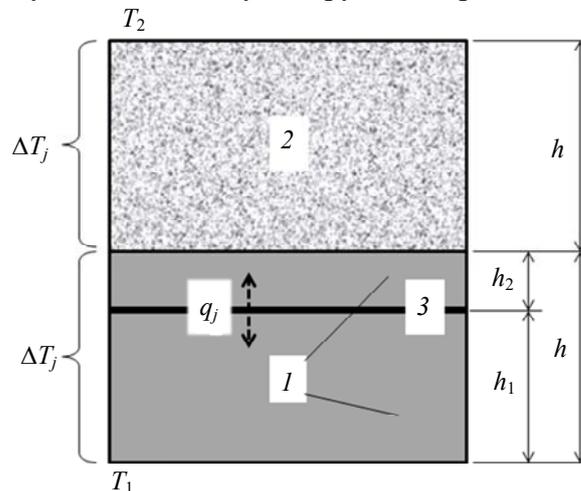
Совокупно с данными определениями уместно напомнить, что теплопроводность макро-, мезо- и вплоть до микрообъектов не является аддитивной физической величиной, а является, равно как, например, температура или давление, интенсивной физической величиной [7]. На практике это означает, что если механически смешать или соединить два материала, обладающие разными коэффициентами теплопроводности, то эффективная теплопроводность их смеси (соединения) не будет равна сумме коэффициентов теплопроводности этих материалов [9].

Из приведенного выше определения многозначной меры для общего случая следует, что N -е количество конкретно взятого физического свойства некоторого i -го объекта может быть определено как произведение некоего j -го коэффициента пропорциональности на единицу количества одноименного физического свойства, носителем которой является многозначная мера, как это, например, осуществляется при измерениях массы, длины, объема и др. Исходя из этого, для конкретного физического свойства анализируемого i -го объекта — его теплопроводности правомерно записать:

$$\lambda_i = k_j \lambda_0, \quad (1)$$

где λ_i — теплопроводность конкретно взятого i -го исследуемого объекта; λ_0 — теплопроводность многозначной меры как единица количества рассматриваемого физического свойства; k_j — j -й коэффициент пропорциональности.

Устройство, представляющее декларируемый новый класс измерений, основано на применении измерительной ячейки, схема которой приведена в работе [3]: см. рисунок, здесь 1 — многозначная мера, где h_1 — толщина ее внешней части, h_2 — толщина внутренней части; 2 — исследуемый образец, 3 — встроенный нагреватель. По мнению разработчиков, измерительная ячейка реализует многозначную меру теплопроводности твердого тела.



Проанализируем данное схемно-методическое решение. В работе [3] приводится уравнение измерения следующего вида:

$$\lambda_i = \lambda_0 + nhq_j / \Delta T_j, \quad (2)$$

где n — отношение теплового сопротивления внешней части многозначной меры к ее общему тепловому сопротивлению, h — толщина исследуемого объекта (образца), q_j — измеряемая поверхностная плотность теплового потока от внутреннего источника теплоты меры, ΔT_j — измеряемый перепад температуры исследуемого образца.

* Там же, с. 258.

Предположим, что мера действительно многозначна, тогда к ней должно быть применимо уравнение (1), подставив которое в уравнение измерения (2), получим

$$k_j \lambda_0 = \lambda_0 + n h q_j / \Delta T_j. \quad (3)$$

Выразим из полученного уравнения коэффициент пропорциональности k_j :

$$k_j = 1 + n h q_j / (\lambda_0 \Delta T_j). \quad (4)$$

Соотношение (4) служит своего рода критерием истины и позволяет получить ответ на вопрос: является ли рассматриваемая мера многозначной. Если, как утверждают разработчики, значение коэффициента теплопроводности λ_i , воспроизводимого мерой, зависит от плотности теплового потока q_j , т.е. плотность теплового потока управляет величиной λ_i , то мера действительно многозначна. Иными словами, это означает, что каждому заданному значению плотности теплового потока q_j соответствует индивидуальное значение коэффициента пропорциональности k_j , или, иначе, одной и той же мере соответствует набор значений указанного коэффициента k_j и, следовательно, теплопроводности λ_i .

Проанализируем соотношение (4) и входящие в него параметры. Во-первых, для конкретно взятой меры теплопроводности параметры n , h и λ_0 являются постоянными величинами. Во-вторых, согласно работе [5] неоспоримо, что стационарный перепад температуры исследуемого образца ΔT_j всегда пропорционален отношению плотности теплового потока q_j к его коэффициенту теплопроводности λ_i с некоторым постоянным коэффициентом пропорциональности, который обозначим, например, $k_1 = \text{const}$. Указанный коэффициент имеет размерность метра и в конкретно рассматриваемом случае определяется толщиной образца и соотношением тепловых проводимостей внешней и внутренней частей меры. Математически это выражается соотношением

$$\Delta T_j = k_1 q_j / \lambda_i, \quad (5)$$

подставив которое в уравнение (4), получим

$$k_j = 1 + n h \lambda_i / (\lambda_0 k_1). \quad (6)$$

В этом соотношении теплопроводность исследуемого образца λ_i , теплопроводность меры λ_0 , параметры n , h и коэффициент k_1 имеют строго фиксированные, постоянные значения. Таким образом, из уравнения (6) явно следует, что значение коэффициента пропорциональности k_j также **не зависит** от плотности теплового потока q_j . Коэффициент пропорциональности k_j определяется только геометрическими размерами меры и поэтому для конкретно взятой меры принимает только одно единственное значение, а не набор значений, как считают разработчики. Из этого следует, что рассматриваемая мера реализует только одно значение теплопроводности — значение ее собственной теплопроводности, которое равно λ_0 , а поэтому является однозначной мерой, следовательно, выдвинутый в работе [3] тезис о многозначности меры несостоятелен и нереализуем.

Структура уравнения измерения (2) создает обманчивое представление, что теплопроводность исследуемого образца 2 (см. рисунок) зависит от поверхностной плотности теплового потока, т.е. от мощности внутреннего нагревателя 3. Для проверки с помощью уравнения теплопроводности Фурье и электротепловой аналогии была решена стационарная одномерная задача нахождения температурного поля измерительной ячейки, в результате чего установлено, что представленное уравнение измерения (2) неверно. В результате решения соответствующей системы уравнений авторами получено следующее конечное соотношение для стационарного перепада температуры исследуемого образца:

$$\Delta T_j = q_j h \left[\frac{\lambda_2 (h - h_2)}{\lambda_i \lambda_2 (h - h_2) + \lambda_1 (\lambda_2 h + \lambda_i h_2)} \right], \quad (7)$$

где λ_1 , λ_2 — теплопроводность внешней и внутренней частей меры соответственно.

Из уравнения (7) следует, что, в противоположность мнению разработчиков, уравнение измерения для теплопроводности λ_i не имеет явного вида, и поэтому из него получить искомое

уравнение измерения не представляется возможным. Докажем, однако, правильность полученного соотношения (7). Для этого рассмотрим вариант, когда теплопроводность исследуемого образца идентична теплопроводности меры, т.е. $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_i = \lambda_0$. Подставив в (7) вместо всех значений $\lambda_i, \lambda_1, \lambda_2$ значение λ_0 , получим

$$\Delta T_j = q_j \frac{h - h_2}{2\lambda_0}. \quad (8)$$

В выбранном варианте рассмотрим два предельных случая.

Первый случай: толщина внутренней части меры равна нулю, т.е. $h_2 = 0$, тогда из уравнения (8) следует, что перепады температуры образца и меры одинаковы и равны $\Delta T_j = q_j h / (2\lambda_0)$, — это означает, что тепловые потоки, направленные в образец и меру, также равны, что верно.

Второй случай: толщина внутренней части меры равна h (образца фактически нет), т.е. $h_2 = h$, тогда из (8) следует, что перепад температуры образца равен нулю, т.е. $\Delta T_j = 0$, что тоже верно.

Особый интерес представляет другой вариант, когда коэффициенты теплопроводности внутренней и внешней частей меры идентичны и равны λ_0 , т.е. $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_0$, а теплопроводность исследуемого образца λ_i отлична от них. Подстановка указанных значений в (7) дает следующее соотношение:

$$\Delta T_j = q_j \frac{h - h_2}{\lambda_0 + \lambda_i}. \quad (9)$$

Выразим из соотношения (9) искомое значение теплопроводности λ_i образца, получаем правильное уравнение измерений:

$$\lambda_i = -\lambda_0 + q_j (h - h_2) / \Delta T_j. \quad (10)$$

Отношение $q_j / \Delta T_j$ в уравнении (10) является величиной постоянной и не зависит от значения q_j , поэтому теплопроводность образца λ_i также не зависит от q_j . Это следует из соотношения, полученного из (8):

$$\frac{q_j}{\Delta T_j} = \frac{2\lambda_0}{h - h_2}. \quad (11)$$

При этом соотношение для введенного ранее коэффициента пропорциональности k_1 с учетом выражений (5) и (8) имеет вид

$$k_1 = \frac{\Delta T_j \lambda_i}{q_j} = \frac{(h - h_2) \lambda_i}{2\lambda_0}, \quad (12)$$

а другой коэффициент пропорциональности k_j , показывающий, многозначна мера или нет, с учетом (12) и (6) определяется выражением

$$k_j = 1 + \frac{2nh}{h - h_2} = \text{const}. \quad (13)$$

Так как коэффициент пропорциональности k_j принимает всего одно значение, из этого следует, что мера однозначна и свойства многозначности не проявляет.

Коснемся другого аспекта рассматриваемого вопроса — точности предложенного метода измерения. Фактически, разработчиками предложен стационарный метод измерения теплопроводности — относительный метод измерения плотности продольного теплового потока за счет использования однозначной меры теплопроводности [9]. В связи с приведенным выше доказательством о несостоятельности многозначности меры и ошибочности уравнения измерения представляется более чем странным, что декларируемая в работах [1, 3] суммарная погрешность воспроизведения единицы теплопроводности данной мерой оценивается не более чем в 1,2 %.

Обратимся вновь к представленному разработчиками уравнению измерения (2), в котором фигурирует поверхностная плотность теплового потока q_j , являющаяся наиболее сложным измеряемым параметром. Наивысшую точность измерения указанного параметра обеспечивает Государственный первичный эталон ГЭТ 172-2016, в котором передача единицы поверхностной плотности теплового потока к средствам измерений осуществляется с предельной допускаемой основной погрешностью, равной 1,5 %. Поэтому сразу возникает вопрос, каким образом можно измерить q_j точнее, чем это позволяет ГЭТ 172-2016. Кроме того, в уравнении измерения (2), помимо параметра q_j , имеются и другие параметры (ΔT_j , λ_0 , n , h), измеренные также с некоторой погрешностью, а поскольку вклад обоих слагаемых в уравнении (2) однопорядковый, то основная погрешность измерения теплопроводности никак не может быть менее 1,5 %. При этом в уравнении измерения совершенно не учтено негативное влияние контактных тепловых сопротивлений на результат измерения. Кроме того, теплопроводность самой меры также измерена с некоторой погрешностью, которая, как предполагается, составляет не менее чем 1,5 %. По мнению авторов, реально достижимый предел допускаемой основной погрешности измерения теплопроводности для современного уровня развития техники составляет $\approx 4\text{—}5\%$, что считается вполне приемлемым для практической инженерии и согласуется с данными других исследователей [10, 11], которые оценивают погрешность в пределах $4\text{—}7\%$. Впрочем, поскольку многозначность меры поставлена под сомнение, говорить в данном ракурсе о точности, по всей видимости, не имеет смысла.

В заключение необходимо отметить следующее: признаков того, что заявленная мера проявляет свойство многозначности, не наблюдается, и в статье это показано. Мера однозначна и обладает одной — собственной — теплопроводностью, поэтому заявление о создании нового класса измерений теплофизических величин преждевременно и вводит в заблуждение. Это заблуждение связано с тем, что многозначные меры, традиционно применяемые к экстенсивным физическим величинам, бесосновательно применены разработчиками к интенсивным физическим величинам, к которым относятся теплопроводность, удельная теплоемкость, температуропроводность, а также температура, давление, плотность, твердость материала и др. Что касается заявленного метода измерения, то нужно пересматривать как само уравнение измерения, так и точность получаемых результатов, в противном случае недостоверные данные о теплопроводности, например, теплоизоляционных материалов могут повлечь за собой реальные материальные потери.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2343466 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения теплопроводности материалов / Н. А. Соколов. Оpubл. 10.01.2009. Бюл. № 1.
2. Пат. 2690717 РФ, МКИ G 01 N 25/20. Способ определения теплоемкости материалов / Н. А. Соколов, А. Н. Соколов. Оpubл. 05.06.2019. Бюл. № 16.
3. Соколов Н. А., Соколов А. Н. Многозначные меры теплопроводности для диапазона $20\text{—}500$ Вт/(мК) // Измерительная техника. 2009. № 7. С. 43—45.
4. Соколов Н. А., Соколов А. Н. Новый класс измерений: многозначные меры теплоемкости твердых тел // Приборы. 2018. № 8. С. 39—43.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности: Учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1967. 600 с.
6. Заричняк Ю. П., Компан Т. А., Ходунков В. П., Кулагин В. И. О возможности реализации многозначных мер в калориметрии // Приборы. 2019. № 5. С. 22—26.
7. Иванов В. А., Заричняк Ю. П. Структуры и теплофизические свойства новых объектов исследований макро-, микро-, мезо- и нанонеоднородных систем и композиционных материалов // Тр. VIII Евразийского симп. по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата, EURASTRENCOLD-2018. Якутск, 2018. С. 194—207.

8. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
9. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М.: Энергия, 1969. 392 с.
10. Ипатов Ю. С., Лейкум В. И., Олейник Б. Н., Патовская З. К. Приборы для измерения теплопроводности // Тр. ВНИИМ. 1962. № 63(123). С. 3—24.
11. Чистов А. Н., Кладов М. Ю., Пронин И. Б., Смирнов А. С. Экспериментальное определение теплопроводности композиционных материалов в широком диапазоне значений при комнатной температуре // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 9. С. 1—13.

Сведения об авторах

Юрий Петрович Заричняк

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

Вячеслав Петрович Ходунков

— канд. техн. наук; ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, лаборатория эталонов и научных исследований в области инфракрасной радиометрии и прикладной пирометрии; ст. научный сотрудник; E-mail: walkerearth@mail.ru

Поступила в редакцию
20.02.2020 г.

Ссылка для цитирования: Заричняк Ю. П., Ходунков В. П. О реализуемости многозначных мер тепловых величин в метрологии // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 3. С. 257—263.

ON THE FEASIBILITY OF MULTI-VALUED MEASURES OF THERMAL QUANTITIES IN METROLOGY

Yu. P. Zarichnyak¹, V. P. Khodunkov²

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

²D. I. Mendeleev Institute for Metrology, 190005, St. Petersburg, Russia
E-mail: walkerearth@mail.ru

An analysis is made of a new class of measurements of thermal quantities, based on the use of multi-valued measures. Using the thermal conductivity of solids as an example, the fundamental fallacy of the proposed approach and the illegality of using the polysemy principle for measures of intense thermophysical quantities are shown. The inconsistency of the declared metrological characteristics of the previously declared method of measuring thermal conductivity with achievable values is proved.

Keywords: measure, ambiguity, intense thermal quantities, measurement, thermal conductivity, specific heat capacity, metrology, accuracy

REFERENCES

1. Patent RU 2343466, G 01 N 25/18, *Sposob opredeleniya teployemkosti materialov* (The Method for Determining the Heat Capacity of Materials), Sokolov N.A., Published 10.01.2009, Bulletin 1. (in Russ.)
2. Patent RU 2690717, G 01 N 25/20, *Sposob opredeleniya teployemkosti materialov* (The Method for Determining the Heat Capacity of Materials), Sokolov N.A., Sokolov A.N., Published 05.06.2019, Bulletin 16. (in Russ.)
3. Sokolov N.A., Sokolov A.N. *Measurement Techniques*, 2009, no. 7, pp. 43–45. (in Russ.)
4. Sokolov N.A., Sokolov A.N. *Instruments*, 2018, no. 8, pp. 39–43. (in Russ.)
5. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* (Heat Conduction Theory), Moscow, 1967, 600 p. (in Russ.)
6. Zarichnyak Yu.P., Kompan T.A., Khodunkov V.P., Kulagin V.I. *Instruments*, 2019, no. 5, pp. 22–26. (in Russ.)
7. Ivanov V.A., Zarichnyak Yu.P. *Trudy VIII Evraziyskogo simpoziuma po problemam prochnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata EURASTRENCOLD-2018* (Proceedings of the VIII Eurasian Symposium on the Problems of the Strength of Materials and Machines for Cold Climate Regions EURASTRENCOLD-2018), 2018, pp. 194–207. (in Russ.)
8. Dul'nev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov* (Thermal Conductivity of Mixtures and Composite Materials), Leningrad, 1974, 264 p. (in Russ.)
9. Osipova V.A. *Ekspperimental'noye issledovaniye protsessov teploobmena* (Experimental Study of Heat Transfer Processes), Moscow, 1969, 392 p. (in Russ.)
10. Ipatov Yu.S., Leykum V.I., Oleynik B.N., Patovskaya Z.K. *Proceedings of D.I. Mendeleev All-Russian*

Institute for Metrology (VNIIM), 1962, no. 63(123), pp. 3–24. (in Russ.)

11. Chistov A.N., Kladov M.Y., Pronin I.B., Smirnov A.S. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, no. 9, pp. 1–13, DOI: 10.18698/2308-6033-2019-9-1920. (in Russ.)

Data on authors

Yuriy P. Zarichnyak

— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Low Temperature Energetics; E-mail: zarich@grv.ifmo.ru

Vyacheslav P. Khodunkov

— PhD; D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Laboratory of Standards and Research in the Field of Infrared Radiometry and Applied Pyrometry; Senior Researcher; E-mail: walkerearth@mail.ru

For citation: Zarichnyak Yu. P., Khodunkov V. P. On the feasibility of multi-valued measures of thermal quantities in metrology. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 3. P. 257—263 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-257-263