

УДК 53.082



Анатычук Л.И.

Анатычук Л.И., Лысько В.В.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина



Лысько В.В.

**О ПОВЫШЕНИИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ
ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
АБСОЛЮТНЫМ МЕТОДОМ**

Приведены результаты компьютерных исследований быстродействия при определении теплопроводности абсолютным методом. Проведен анализ погрешностей измерений, связанных с отклонениями от линейного распределения температуры в исследуемом образце при достижении стационарных условий. Установлено, что для достижения приемлемых значений этих погрешностей процесс проведения измерений должен быть довольно продолжительным – 10-15 часов на измерение температурной зависимости одного образца. Разработаны способы повышения скорости выхода системы в стационарный режим. Установлено, что пропускание через исследуемый образец переменного тока позволяет повысить быстродействие измерений в 3-5 раз за счет ускорения разогрева центральной части образца теплом Джоуля. Дополнительное повышение скорости измерений может быть достигнуто при форсированном разогреве горячей стороны образца эталонным нагревателем. Комбинирование этих двух методов позволяет повысить быстродействие измерений до 8-10 раз.

Ключевые слова: измерения, погрешности, электропроводность, теплопроводность

The results of computer investigations of the rapidity of thermal conductivity measurement by the absolute method are presented. Measurement errors caused by deviations from a linear distribution of temperature in the observable sample under the steady-state conditions have been analyzed. It has been established that in order to reach the acceptable values of these errors, measurement procedure must take a good deal of time, namely 10-15 hours to measure the temperature dependence of one sample. Methods for increasing the rapidity of reaching the steady state by the system have been developed. It has been established that alternating current passed through the sample under study permits to increase measurement rapidity by a factor of 3-5 due to accelerated heating of the sample central part by the Joule heat. Further increase of measurement rapidity can be achieved with a forced heating of the sample hot side by a reference heater. A combination of these two methods allows increasing measurement rapidity up to 8-10 times.

Key words: measurements, errors, electroconductivity, thermal conductivity

Введение

Общая характеристика проблемы. Эффективность термоэлектрических материалов является основным фактором, определяющим эффективность термоэлектрических преобразователей энергии. Успех в технологии и материаловедении термоэлектрических материалов в первую очередь зависит от четкой корреляции между термоэлектрическими свойствами материалов и технологическими особенностями способа их получения. Отыскание такого соответствия, в первую очередь зависит от точности измерения электропроводности, термоЭДС и

теплопроводности материалов в заданном интервале температур, поскольку результаты влияния технологических воздействий на вещество могут превысить погрешность измерения.

Наиболее сложным является процесс измерения теплопроводности в широком интервале температур. Как показал анализ литературы, наиболее надежные результаты могут быть получены при определении теплопроводности абсолютным методом [1-6]. Кроме того, этот метод позволяет реализовать одновременно и измерение термоЭДС, и теплопроводности, а следовательно – и определение термоэлектрической добротности материала.

При применении абсолютного метода проблемным является быстродействие измерений. Необходимость достижения стационарных условий вызывает увеличение продолжительности измерений. Так, для измерения температурной зависимости одного образца в интервале температур 30 – 500 °С необходимо 10-15 часов. Отклонение от стационарного режима проведения эксперимента является важным фактором, который может влиять на точность измерения теплопроводности. Неравномерность распределения температуры в исследуемом образце, возникающая в процессе выхода в стационарный режим, может служить источником погрешностей в определении перепада температуры на образце ΔT , а следовательно – теплопроводности образца

$$\kappa = \frac{Q}{\Delta T} \frac{l}{S}. \quad (1)$$

Здесь Q – тепловая мощность, которая проходит через образец, l – длина, а S – площадь поперечного сечения образца.

Целью данной работы является разработка методов повышения быстродействия измерений при обеспечении достигнутого уровня точности.

Физическая и математическая модели

Исследуемый образец длиной l и диаметром поперечного сечения d прикреплен одной стороной к термостату, как это показано на рис. 1. Температура термостата – T_0 . К другой стороне образца подводится от нагревателя тепло такой мощностью Q_0 , чтобы после выхода в стационарный режим на горячей стороне образца установилась температура

$$T_1 = T_0 + \frac{Q_0}{\kappa} \frac{l}{S}.$$

Боковую поверхность образца будем считать абсолютно теплоизолированной.

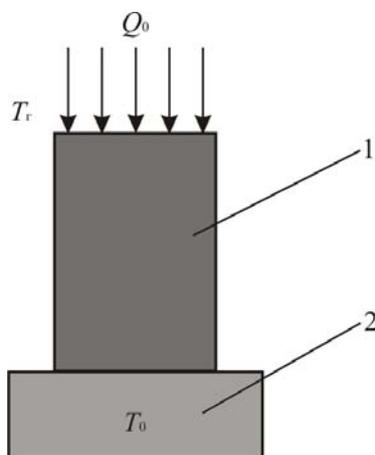


Рис. 1. Схема абсолютного метода измерения теплопроводности.
1 – исследуемый образец, 2 – термостат.

После включения нагревателя распределение температуры в образце будет изменяться со временем и зависеть от свойств образца: теплопроводности k , теплоемкости C и его геометрических размеров. Для нахождения этого распределения в любой момент времени необходимо решить нестационарное уравнение теплопроводности

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = 0 \quad (2)$$

со следующими граничными условиями:

- холодная сторона образца термостатирована при температуре T_0 ($T = T_0$),
- на горячую сторону образца подается постоянный во времени тепловой поток Q_0 ($\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \frac{Q_0}{S}$),
- боковая поверхность образца адиабатически изолирована ($\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0$).

Результаты исследования быстродействия измерений

Оценка длительности проведения измерений, обеспечивающей стационарные условия эксперимента, требует исследования влияния отклонений от стационарности на их точность.

Получены зависимости распределений температуры в исследуемом образце от времени в процессе выхода системы в стационарный режим. Расчеты проведены для образца термоэлектрического материала на основе *Bi-Te* типичных для измерений теплопроводности абсолютным методом размеров – длиной 12 мм и диаметром поперечного сечения 8 мм. Теплопроводность образца принималась равной 1.4 Вт/(м·К), теплоемкость – 154 Дж/(кг·К), температура термостата – 300 К. Теплоемкость нагревателя образца не учитывалась.

При необходимости такие расчеты могут быть воспроизведены для других интервалов температур и размеров образцов.

На рис. 2 представлены результаты расчетов распределения температуры вдоль образца для различных значений времени выхода системы в стационарный режим. Как видно, эти распределения имеют нелинейный характер.

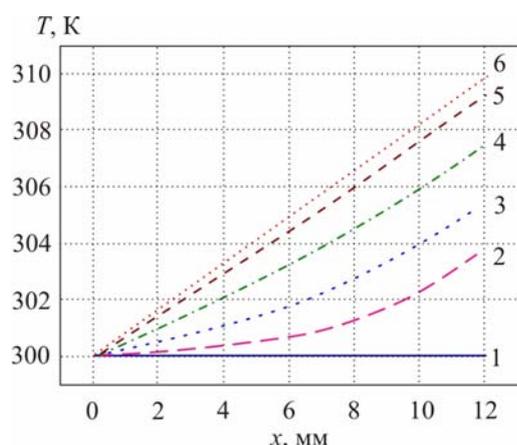


Рис. 2. Изменение со временем распределений температуры вдоль образца
1-0 с; 2 – 15 с; 3 – 30 с; 4 – 60 с; 5 – 120 с; 6 – 240 с.

Отклонения от линейного распределения показаны на рис. 3 и рис. 4. Самые большие в процентном отношении отклонения от линейности будут вблизи термостата, а следовательно, выход горячей стороны образца (нагревателя образца) в стационарный режим не может

служить ориентиром для начала измерений теплопроводности. Более детально это видно на рис. 5 и рис. 6, на которых показано изменение температуры горячего конца образца со временем, а также отклонение от линейного распределения температуры вдоль образца в момент времени, когда отклонение от ожидаемого значения температуры на горячей стороне образца составляет 1% (для данного случая – $t = 224$ с).

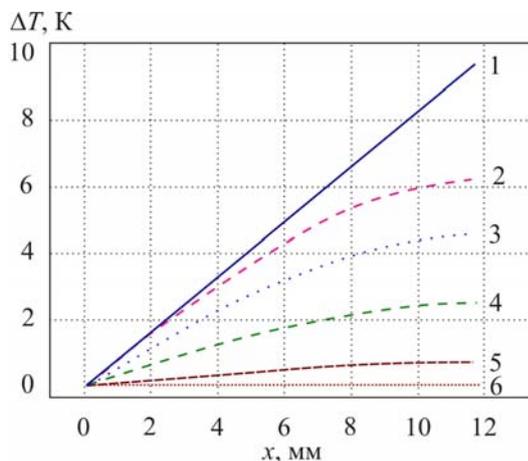


Рис. 3. Отклонение распределения температуры вдоль образца от линейного при выходе в стационарный режим:
1-0 с; 2 – 15 с; 3 – 30 с; 4 – 60 с;
5 – 120 с; 6 – 240 с.

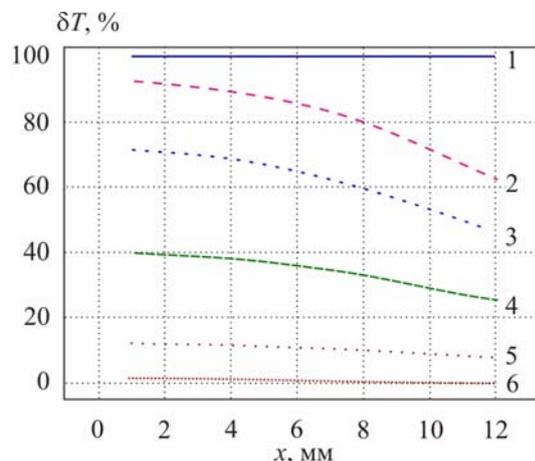


Рис. 4. Относительные отклонения распределения температуры вдоль образца от линейного при выходе в стационарный режим:
1-0 с; 2 – 15 с; 3 – 30 с; 4 – 60 с;
5 – 120 с; 6 – 240 с.

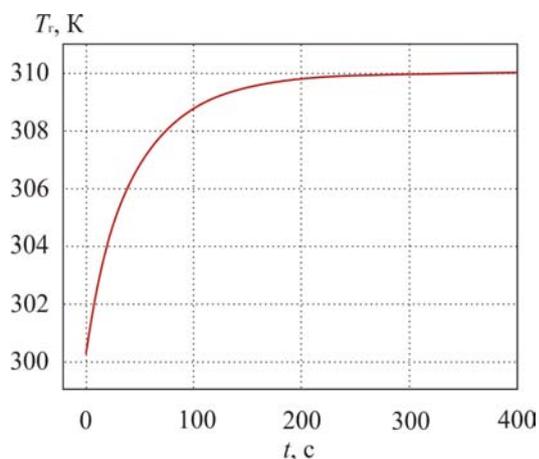


Рис. 5. Временная зависимость температуры горячей стороны образца.

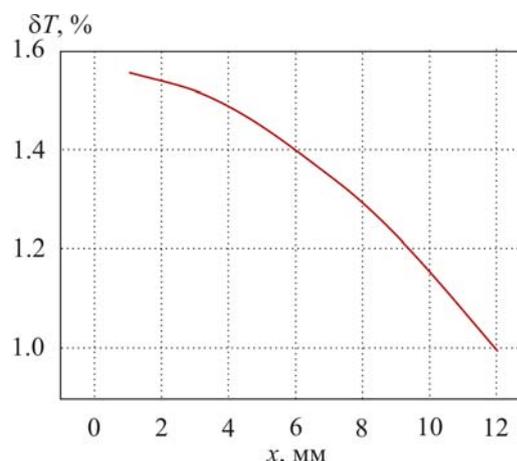


Рис. 6. Отклонение распределения температуры вдоль образца от линейного (в момент времени, когда отклонение от стационарного состояния на горячей стороне образца составляет 1%).

Зависимость погрешности в определении теплопроводности от отклонений температуры горячей стороны образца от заданного значения представлена на рис. 7 (при размещении измерительных термопар на боковой поверхности образца на расстоянии 5 мм друг от друга).

На рис. 8 показаны временные зависимости погрешности в определении теплопроводности, а также скорости изменения температуры горячей стороны образца. Зависимость погрешности измерения теплопроводности от скорости изменения температуры горячей стороны образца показана на рис. 9. Эта зависимость может служить основой для определения момента выхода системы в стационарный режим. Так, например, для достижения

погрешности в определении теплопроводности, связанной с отклонениями от стационарных условий, менее 0.5% необходимо дождаться, пока температура горячей стороны образца будет меняться медленнее чем 0.05 К/мин после включения нагревателя.

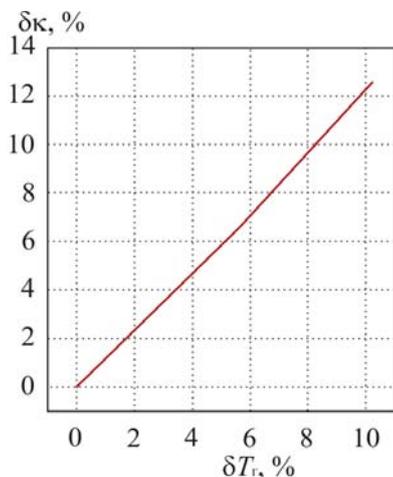


Рис. 7. Зависимость погрешности в определении теплопроводности от точности стабилизации температуры горячей стороны образца.

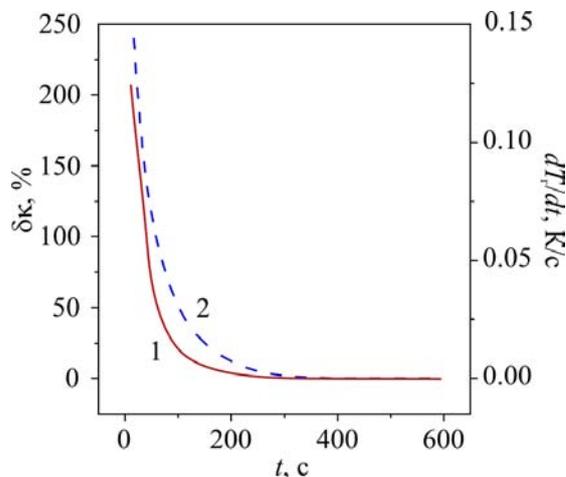


Рис. 8. Временные зависимости погрешности определения теплопроводности (1) и скорости изменения температуры горячей стороны образца (2) в процессе выхода в стационарный режим.

В связи с необходимостью обеспечения стационарных условий проведения эксперимента важным становится вопрос быстродействия измерений. На рис. 10 показана зависимость промежутка времени t_0 , за который максимальное отклонение от заданного линейного распределения температуры уменьшится до 1%, от длины образца.

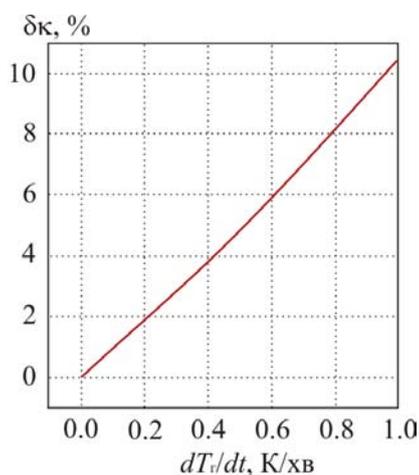


Рис. 9. Зависимость погрешности в определении теплопроводности от скорости изменения температуры горячей стороны образца при выходе в стационарный режим.

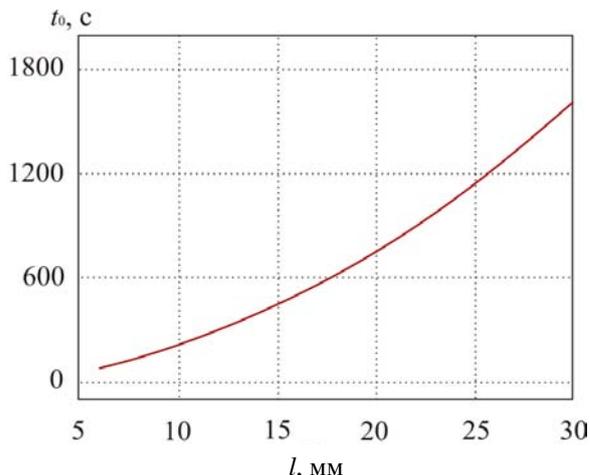


Рис. 10. Зависимость времени выхода в стационарный режим от длины образца.

Одним из вариантов повышения быстродействия измерений может быть временное пропускание через образец переменного тока. Это позволит ускорить нагрев центральной части образца за счет выделения в его объеме тепла Джоуля. Были проведены исследования

распределений температуры в образце для случая, когда в начальный момент после включения нагревателя через образец некоторое время пропускать переменный ток заданной величины. Так, например, если первые 30 с через образец пропускать ток величиной 15 А, то уже в момент времени $t_0 = 96$ с максимальное отклонение от линейного распределения будет меньше 1%. Такие результаты свидетельствуют о возможности повысить скорость выхода распределения температуры вдоль образца в стационарный режим и достичь его в 3 раза быстрее, чем без пропускания через образец тока.

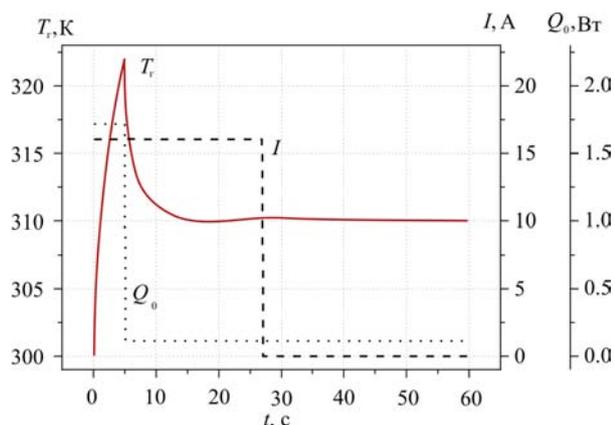


Рис. 11. Временные зависимости температуры горячей стороны образца, тока через образец и мощности нагревателя для случая пропускания переменного тока через образец и форсированного разогрева его горячей стороны.

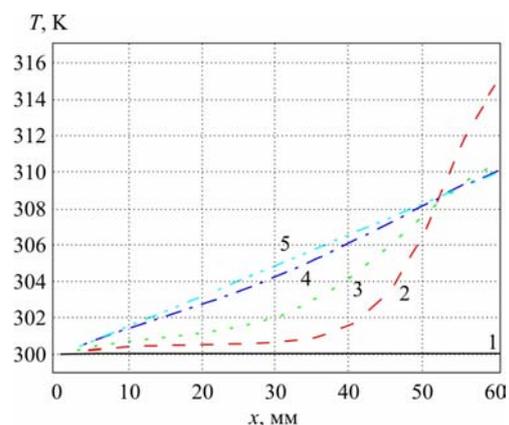


Рис. 12. Изменение со временем распределений температуры вдоль образца для случая пропускания переменного тока через образец и форсированного разогрева его горячей стороны: 1-0 с; 2 – 6 с; 3 – 12 с; 4 – 24 с; 5-48 с.

Дополнительное повышение быстродействия измерения может быть достигнуто при использовании наряду с пропусканием через образец переменного тока также и форсированного разогрева горячей стороны образца в начальный момент после включения нагревателя. На рис. 11 показан один из частных случаев применения такого способа повышения быстродействия. Распределения температуры в образце для этого случая показаны на рис. 12. Время, за которое максимальные отклонения от линейного распределения будут находиться в пределах 1%, будет составлять 38 с, что позволяет говорить о возможности повышения быстродействия до 8 – 10 раз.

Проведенные исследования являются основой для разработки измерительной установки с повышенным быстродействием, которая позволит расширить возможности применения абсолютного метода измерений, особенно при определении свойств образцов больших размеров.

Выводы

1. Установлено, что отклонение температуры горячей стороны образца от заданного значения не может служить критерием выхода системы в стационарный режим, поскольку внутри образца при этом будут иметь место отклонения от линейного распределения.
2. Получены зависимости погрешностей в определении теплопроводности образца от времени в процессе выхода в стационарный режим, а также от отклонений от ожидаемого значения температуры горячей стороны образца. Установлено, что погрешность в определении теплопроводности на 20% превышает относительное отклонение от ожидаемого значения

температуры горячей стороны образца.

3. Разработан способ повышения скорости выхода системы в стационарный режим. Установлено, что использование временного пропускания через исследуемый образец переменного тока позволяет повысить быстродействие измерений в 3 – 5 раз, а в сочетании с форсированным нагревом горячей стороны образца – до 10 раз.

Литература:

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: [справочник] / Л.И. Анатычук – К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
2. Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей / А.С. Охотин, А.С. Пушкарский, Р.П. Боровикова, В.А. Симонов. – М. : Наука, 1974. – 167с.
3. J.P. Moore, R.K. Williams, R.S. Graves. Precision measurement of the thermal conductivity, electrical resistivity, and Seebeck coefficient from 80 to 400 K and their application to pure molybdenum.– Rev. Sci. Instrum, 1974, 45, №1, 87-95.
4. Anatyчук L.I., Pervozvansky S.V., Razinkov V.V. Precise measurement of cooling thermoelectric material parameters: methods, arrangements and procedures. Proc. of the 12th Intern. conf. thermoelectrics. Japan, 1993, p.p. 553-564.
5. Анатычук Л.И. Установка для измерения свойств термоэлектрического материала / Л.И. Анатычук, Н.В. Гаврилюк, В.В. Лысько // Термоэлектричество. – 2010. – №3. – С. 43-51.
6. Анатычук Л.И. Исследование влияния излучения на точность измерения теплопроводности абсолютным методом / Л.И. Анатычук, В.В. Лысько // Термоэлектричество. – 2012. – №1. – С. 70-80.

Поступила в редакцию 03.11.2014.