

УДК 53.082



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І., Лисько В.В.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна



Лисько В.В.

ПРО ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ АБСОЛЮТНИМ МЕТОДОМ

Наведено результати комп'ютерних досліджень швидкодії при визначенні теплопровідності абсолютним методом. Проведено аналіз похибок вимірювань, пов'язаних з відхиленнями від лінійного розподілу температури у досліджуваному зразку при встановленні стаціонарних умов. Встановлено, що для досягнення прийнятних значень цих похибок процес проведення вимірювань повинен бути досить тривалим – 10-15 годин на вимірювання температурної залежності одного зразка. Розроблено способи підвищення швидкості виходу системи в стаціонарний режим. Встановлено, що пропускання через досліджуваний зразок змінного струму дає можливість підвищити швидкодію вимірювань в 3-5 разів за рахунок прискорення розігріву центральної частини зразка теплом Джоуля. Додаткове підвищення швидкості вимірів може бути досягнуте за форсованого розігріву гарячої сторони зразка еталонним нагрівачем. Комбінування цих двох методів робить можливим підвищити швидкодію вимірів до 8-10 разів.

Ключові слова: теплопровідність, вимірювання похибки, швидкість, абсолютний метод.

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: thermal conductivity, measurement error, rapidity, absolute method.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Ефективність термоелектричних матеріалів – основний чинник ефективності термоелектричних перетворювачів енергії. Успіх у технології та матеріалознавстві термоелектричних матеріалів у першу чергу залежить від чіткої кореляції між термоелектричними властивостями матеріалів та технологічними особливостями їх отримання. Знаходження такої відповідності в першу чергу залежить від точності вимірювання

електропровідності, термоЕРС та теплопровідності матеріалів у заданому інтервалі температур, оскільки результати впливів на речовину можуть виявитись меншими, ніж похибка вимірювання.

Найскладніший процес вимірювання теплопровідності в широкому інтервалі температур. Як показав аналіз літератури, найбільш надійні результати можуть бути отримані при визначенні теплопровідності абсолютним методом [1-6]. Крім того, цей метод дає можливість реалізувати одночасно і вимірювання термоЕРС та теплопровідності, а, отже, визначення термоелектричної добротності матеріалу.

Із застосуванням абсолютного методу проблемною є швидкодія вимірювань. Необхідність досягнення стаціонарних умов робить вимірювання довготривалими: для вимірювання температурної залежності одного зразка в інтервалі температур 30 – 500 °С необхідно 10-15 годин. При цьому відхилення від стаціонарного режиму проведення експерименту є важливим фактором, що може впливати на точність вимірювання теплопровідності. Відхилення від лінійності розподілу температури у досліджуваному зразку, що виникають в процесі виходу в стаціонарний режим, можуть слугувати джерелами похибок у визначенні перепаду температури на зразку ΔT , а отже і теплопровідності зразка

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

де: Q – теплова потужність, що проходить через зразок, l – довжина зразка, S – площа поперечного перерізу зразка.

Мета цієї роботи – розробка методів підвищення швидкодії вимірювань при забезпеченні досягнутого рівня точності.

Фізична та математична моделі

Досліджуваний зразок довжиною l та діаметром d прикріплений однією стороною до термостату, як це показано на рис. 1. Температура термостата – T_0 . На іншу сторону зразка подається теплова потужність Q_0 від нагрівника зразка, за якої після виходу в стаціонарний режим на гарячій стороні зразка повинна встановитись температура T_z

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

Бічна поверхня зразка є адіабатично ізолюваною.

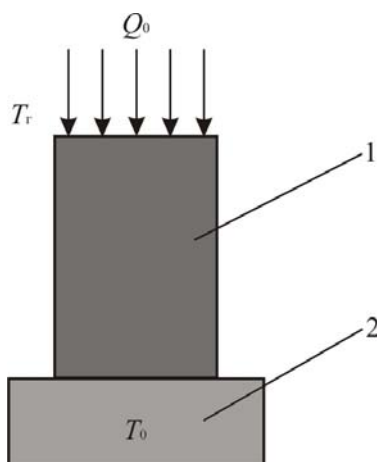


Рис. 1. Схема абсолютного методу вимірювання теплопровідності.

1 – досліджуваний зразок, 2 – термостат.

Розподіл температури в зразку після включення нагрівника змінюватиметься з часом та залежатиме від властивостей зразка – теплопровідності κ , теплоємності C та його геометричних розмірів. Для знаходження цього розподілу в будь-який момент часу необхідно розв'язати нестационарне рівняння теплопровідності

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

з такими граничними умовами:

- холодна сторона зразка термостатована за температури T_0 :

$$T = T_0,$$

- на гарячу сторону зразка подається незмінний в часі тепловий потік Q_0 :

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \frac{Q_0}{S},$$

- бічна поверхня зразка адіабатично ізольована:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0.$$

Результати дослідження швидкодії вимірювань

Для оцінки часу, необхідного для проведення вимірювань, упродовж якого забезпечуються стаціонарні умови експерименту, потрібно дослідити вплив відхилень від стаціонарності на точність вимірювання.

Отримано залежності розподілів температури в досліджуваному зразку від часу в процесі виходу системи в стаціонарний режим. Розрахунки проведено для зразка термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te* типових для вимірювань теплопровідності абсолютним методом розмірів – довжиною 12 мм та діаметром 8 мм. Теплопровідність зразка – 1.4 Вт/(м·К), теплоємність – 154 Дж/(кг·К). Температура термостата – 300К. Теплоємність нагрівника зразка не враховувалась. За необхідності ці результати можуть бути відтворені для інших інтервалів температур та розмірів зразків.

На рис. 2. показано розподіли температури вздовж зразка для різного часу виходу системи в стаціонарний режим. Як видно, ці розподіли мають нелінійний характер.

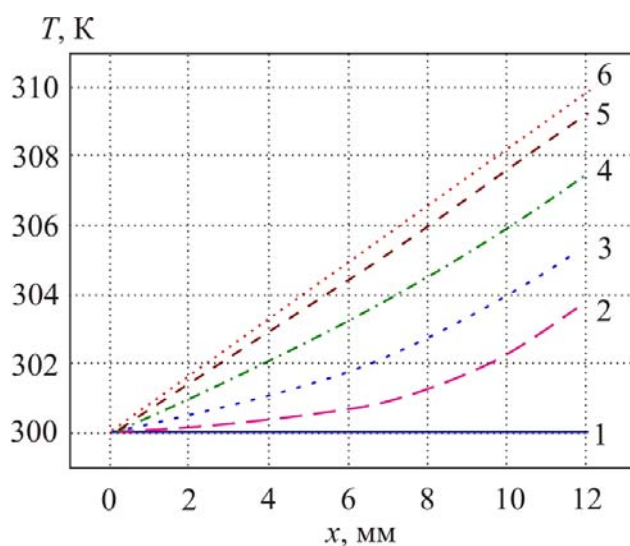


Рис. 2. Зміна з часом розподілів температури вздовж зразка.
1 – 0 с, 2 – 15 с, 3 – 30 с, 4 – 60 с,
5 – 120 с, 6 – 240 с.

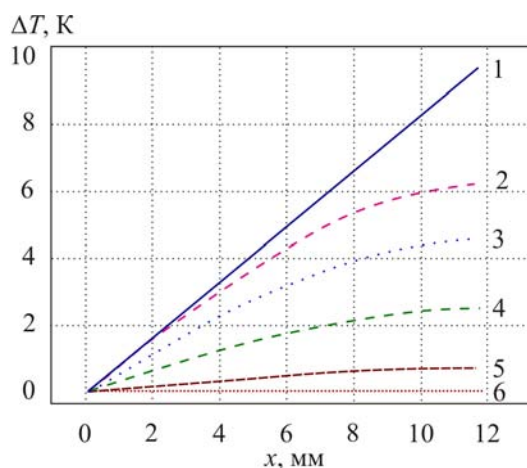


Рис. 3. Відхилення розподілу температури вздовж зразка від лінійного при виході в стаціонарний режим.

1 – 0 с, 2 – 15 с, 3 – 30 с, 4 – 60 с, 5 – 120 с, 6 – 240 с.

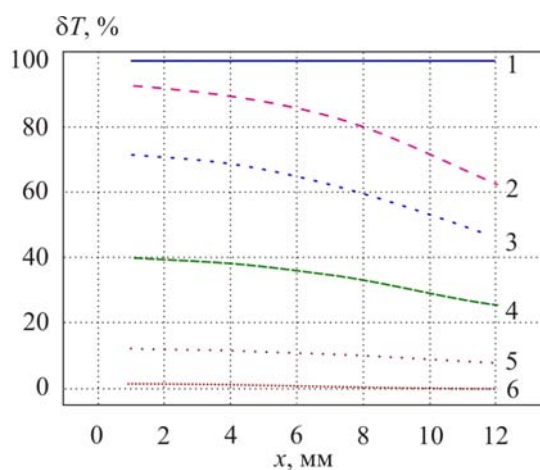


Рис. 4. Відносні відхилення розподілу температури вздовж зразка від лінійного при виході в стаціонарний режим.

1 – 0 с, 2 – 15 с, 3 – 30 с, 4 – 60 с, 5 – 120 с, 6 – 240 с.

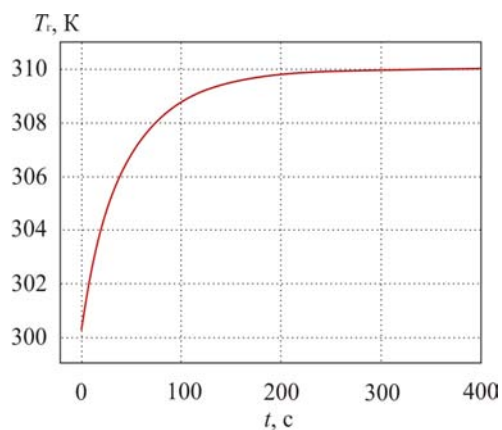


Рис. 5. Часова залежність температури гарячої сторони зразка.

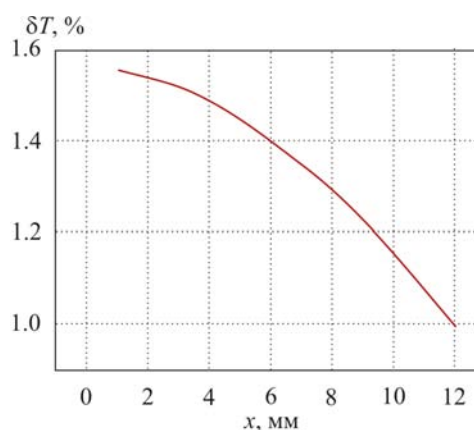


Рис. 6. Відхилення розподілу температури вздовж зразка від лінійного (в момент часу, коли відхилення від стаціонарного стану на гарячій стороні зразка становить 1%).

Відхилення від лінійного розподілу показано на рис. 3, 4. Найбільші в процентному відношенні відхилення від лінійності будуть поблизу термостата, а отже, вихід гарячої сторони зразка (нагрівника зразка) в стаціонарний режим не може слугувати орієнтиром для початку вимірювань теплопровідності. Це більш детально видно, виходячи з рис. 5, 6, на яких показано зміну температури гарячого кінця зразка з часом та відхилення від лінійного розподілу температури вздовж зразка в момент часу, коли відхилення від очікуваного значення температури на гарячій стороні зразка становить 1% (для даного випадку – $t = 224$ с).

Залежність похибки у визначенні теплопровідності від відхилень температури гарячої сторони зразка від заданого значення показано на рис. 7 (за розміщення вимірювальних термопар на бічній поверхні зразка на відстані 5 мм одна від одной).

На рис. 8 показано часові залежності похибки у визначенні теплопровідності, а також швидкості зміни температури гарячої сторони зразка. Залежність похибки вимірювання теплопровідності від швидкості зміни температури гарячої сторони зразка показано на рис. 9. Ця залежність може слугувати основою для визначення моменту виходу системи в стаціонарний режим. Так, наприклад, для досягнення похибки у визначенні теплопровідності, пов'язаної з відхиленнями від стаціонарних умов, меншої 0.5%, необхідно дочекатись часу після включення нагрівника, коли температура гарячої сторони зразка змінюватиметься повільніше, ніж 0.05 К/хв.

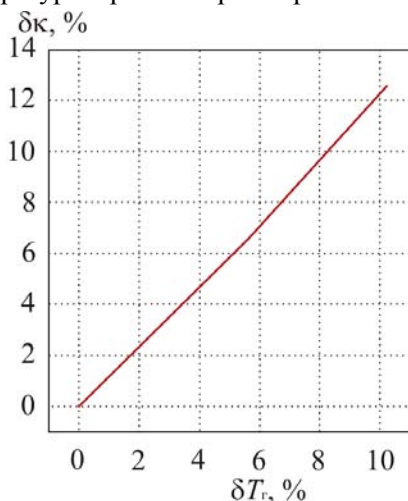


Рис. 7. Залежність похибки у визначенні теплопровідності від точності стабілізації температури гарячої сторони зразка.

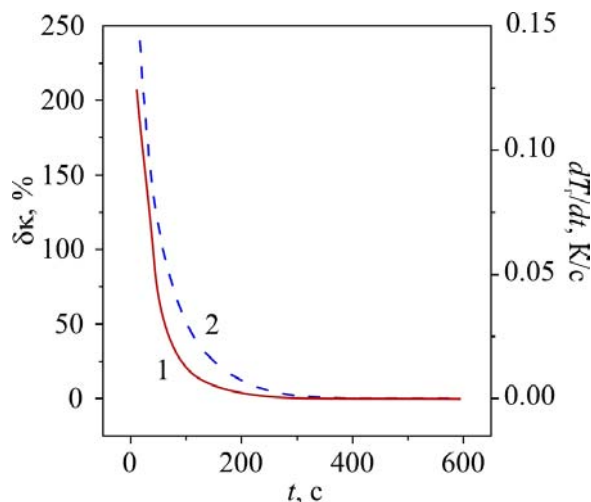


Рис. 8. Часові залежності похибки визначення теплопровідності (1) та швидкості зміни температури гарячої сторони зразка (2) в процесі виходу в стаціонарний режим.

У зв'язку з необхідністю забезпечення стаціонарних умов проведення експерименту важливим стає питання швидкодії вимірювань. На рис. 10 показано залежність часу t_0 , за який максимальне відхилення від заданого лінійного розподілу температури зменшиться до 1%, від довжини зразка.

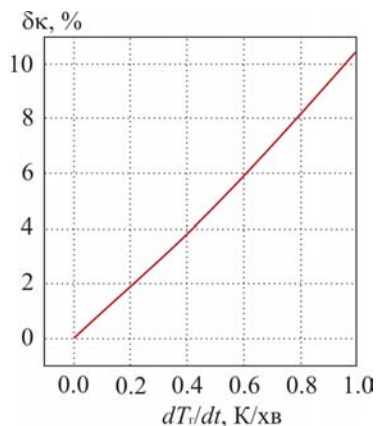


Рис. 9. Залежність похибки у визначенні теплопровідності від швидкості зміни температури гарячої сторони зразка з виходом у стаціонарний режим.

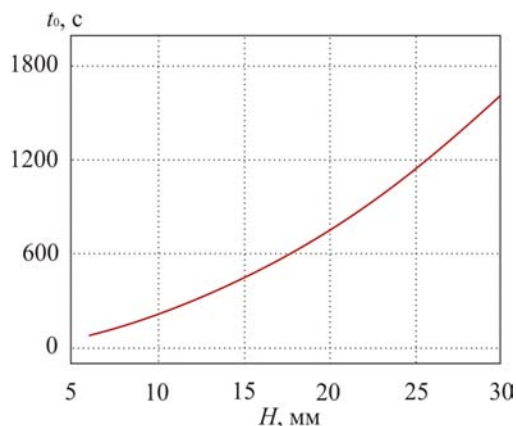


Рис. 10. Залежність часу виходу в стаціонарний режим від довжини зразка.

Одним з варіантів підвищення швидкодії вимірювань може бути тимчасове пропускання через зразок змінного струму. Це дасть можливість пришвидшити нагрів центральної частини зразка за рахунок виділення в його об'ємі тепла Джоуля. Було проведено дослідження розподілів температури в зразку для випадку, коли в початковий момент після включення нагрівника через зразок деякий час пропускати змінний струм заданої величини. Так, наприклад, якщо перші 30 с через зразок пропускати струм величиною 15А, то вже в момент часу $t_0 = 96$ с максимальне відхилення від лінійного розподілу буде меншим 1%. Такі результати свідчать про можливість підвищити швидкість виходу розподілу температури вздовж зразка в стаціонарний режим утричі швидше, ніж без пропускання через зразок струму.

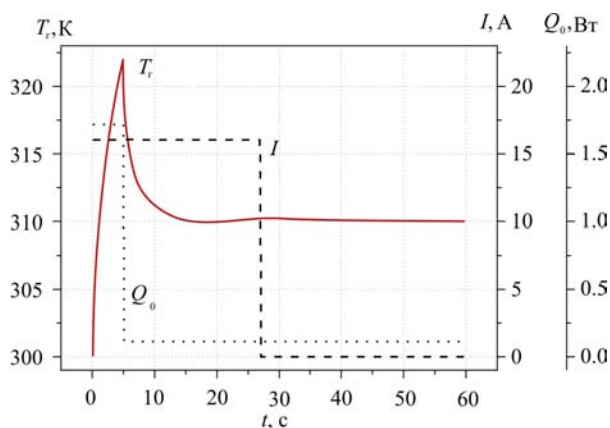


Рис. 11. Часові залежності температури гарячої сторони зразка, струму через зразок та потужності нагрівника для випадку пропускання змінного струму через зразок та форсованого розігріву його гарячої сторони.

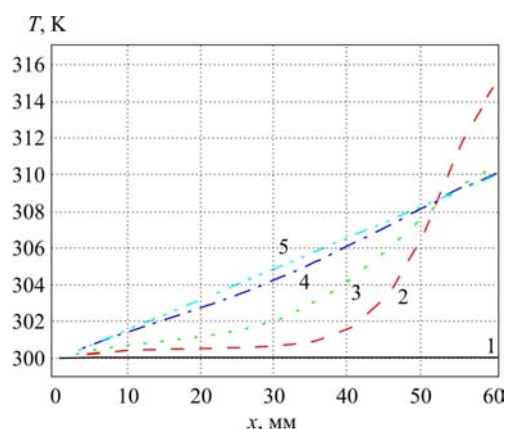


Рис. 12. Зміна з часом розподілів температури вздовж зразка для випадку пропускання змінного струму через зразок та форсованого розігріву його гарячої сторони.
1 – 0 с, 2 – 6 с, 3 – 12 с, 4 – 24 с, 5 – 48 с.

Додаткове підвищення швидкодії вимірювання може бути досягнуте за використання поряд з пропусканням через зразок змінного струму також і форсованого розігріву гарячої сторони зразка в початковий момент після включення нагрівника. На рис. 11 показано один з часткових випадків застосування такого способу підвищення швидкодії. Розподіли температури в зразку для цього випадку показано на рис. 12. Час, за який максимальні відхилення від лінійного розподілу знаходяться в межах 1%, складатиме 38 с, що дає підставу говорити про можливість підвищення швидкодії до 8-10 разів.

Проведені дослідження є основою для розробки вимірювальної установки з підвищеною швидкістю, що робить можливим розширити можливості застосування абсолютного методу вимірювань, особливо при визначенні властивостей зразків великих розмірів.

Висновки

1. Встановлено, що відхилення температури гарячої сторони зразка від заданого значення не може слугувати критерієм виходу системи в стаціонарний режим, оскільки всередині зразка при цьому будуть наявні відхилення від лінійного розподілу.
2. Отримано залежності похибок у визначенні теплопровідності зразка від часу в процесі виходу в стаціонарний режим, а також від відхилень від очікуваного значення температури гарячої сторони зразка. Встановлено, що похибка у визначенні теплопровідності на 20% перевищує відносне відхилення від очікуваного значення температури гарячої сторони зразка.
3. Розроблено спосіб підвищення швидкості виходу системи в стаціонарний режим. Встановлено, що використання тимчасового пропускання через досліджуваний зразок змінного струму дає можливість підвищити швидкість вимірювань в 3-5 разів, а в поєднанні з форсованим нагрівом гарячої сторони зразка – до 10 разів.

Література

1. Анатичук Л.І. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. / Л.І. Анатичук // – К.: Наук. думка, 1978.
2. Методы измерения характеристики термоэлектрических материалов и преобразователей. / А.С. Охотин, А.С. Пушкарський, Р.П. Боровикова [и др.] // – М. : Наука, 1974. – 167с.
3. Moore J.P., Williams R.K., Graves R.S. 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. Anatychuk 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. Анатичук Л.І. станова для вимірювання властивостей напівпровідникового термоелектричного матеріалу./ Л.І. Анатичук, М.В. Гаврилюк, В.В. Лисько // Термоелектрика. – 2010. – №3. – С. 41 - 49.
6. Анатичук Л.І. Дослідження впливу випромінювання на точність вимірювання теплопровідності абсолютним методом. / Л.І. Анатичук, В.В. Лисько // Термоелектрика. – 2012. – №1. – С. 67 - 76

Надійшла до редакції 03.11.2014