

УДК 53.082



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І. *ак. НАН України,^{1,2}*
Лисько В.В. *канд. фіз.-мат. наук^{1,2}*

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,
e-mail: anatysh@gmail.com;

²Чернівецький національний університет імені
Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна
e-mail: anatysh@gmail.com



Лисько В.В.

МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ ВПЛИВУ ЕФЕКТУ ПЕЛЬТЬЄ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ДВОЗОНДОВИМ МЕТОДОМ

Наведено опис методу усунення впливу ефекту Пельтьє при вимірюванні електропровідності термоелектричних матеріалів двозондовим методом шляхом компенсації охолоджуючої дії ефекту Пельтьє теплом електричного нагрівника. Представлено результати комп'ютерних досліджень ефективності застосування такого методу та можливих при цьому величин похибок. Запропоновано методику визначення коефіцієнту термоЕРС матеріалу, виходячи із співвідношення Томсона. Бібл. 9, Рис. 6.

Ключові слова: електропровідність, ефект Пельтьє, похибка, термоелектричний матеріал.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Важливу роль при розробці та виготовленні термоелектричних перетворювачів енергії, а також приладів на їх основі, відіграє контроль якості вихідного термоелектричного матеріалу. Він здійснюється шляхом визначення термоелектричних параметрів матеріалу – електропровідності, теплопровідності, термоЕРС та добротності. При цьому найкращими, з точки зору точності вимірювань, є комплексні вимірювання всіх цих параметрів на одному зразку. Такі вимірювання можуть бути реалізовані з використанням абсолютного методу [1].

В основу визначення електропровідності покладено двозондовий метод вимірювання, при якому струм пропускається через торцеві поверхні зразка, а електричний потенціал на його поверхні вимірюється двома зондами з відомою відстанню між ними [2, 3]. Електропровідність обчислюється за значеннями струму і різниці потенціалів між зондами з урахуванням геометричних розмірів (площі перерізу зразка і відстані між зондами). Такий метод вважається загально визнаним для дослідження напівпровідникового матеріалу (міжнародний стандарт SEMI MF397-02 «Test Method for Resistivity of Silicon Bars Using a Two-Point Probe»).

Аналіз літератури. У роботах [4, 5] розглянуто основні джерела похибок двозондового методу для випадку довгих стрижнів (злитків) термоелектричного матеріалу:

- неоднорідність густини струму у злитку через підведення струму до торця злитка не рівномірно по всій його поверхні, а тільки в місцях контакту з струмопідводами;

- неізотермічні умови, викликані впливом ефектів Пельтьє і Джоуля, а також теплообміном з навколишнім середовищем.

З неоднорідністю густини струму борються шляхом розташування вимірювальних зондів по можливості далі від струмових контактів, де електричне поле найбільш одновимірне.

Складніше задовольнити умову ізотермічності зразків. При протіканні струму його порушення призводить до виникнення на зондах крім різниці потенціалів ще і термоЕРС. При цьому неізотермічність в першу чергу виникає через дію ефекту Пельтьє в місцях електричних з'єднань зразка з струмовими контактами. Різниця потенціалів між зондами від протікання струму і термоЕРС від неізотермічності зразка можуть бути величинами одного порядку, що призводить до досить грубих помилок. Для зменшення цієї похибки рекомендується пропускати через зразок змінний струм достатньо високої частоти, який повинен запобігти впливу ефекту Пельтьє [6]. Однак, в цьому випадку виникають труднощі у вимірюванні різниці потенціалів на змінному струмі, викликані недостатньою точністю вимірювальної апаратури та різними наводками.

Використовуються також і вимірювання спаду напруги в момент включення струму, коли вплив ефекту Пельтьє буде незначним через теплоємність матеріалу [7]. У роботі [8] запропоновано використання запису часової залежності перехідного процесу при виключенні струму через зразок та знаходження омичної складової напруги U_{σ} як різниці між стаціонарним значенням напруги ($U_{\alpha} + U_{\sigma}$) та термоЕРС U_{α} . Такі методи вимагають високої швидкодії вимірювальних приладів та автоматизації вимірювального обладнання для усунення суб'єктивного фактора.

Метою даної роботи є дослідження ефективності методу усунення впливу ефекту Пельтьє у стаціонарних умовах шляхом компенсації охолоджуючої дії ефекту Пельтьє теплом електричного нагрівника.

Фізична та комп'ютерна моделі методу компенсації впливу ефекту Пельтьє теплом електричного нагрівника

Фізична модель двозондового методу вимірювання електропровідності з компенсацією впливу ефекту Пельтьє теплом електричного нагрівника наведена на рис. 1. Вона містить зразок термоелектричного матеріалу, розташований між електричним нагрівником та термостатом. На бічній поверхні зразка розміщено два вимірювальні потенціальні зонди та дві термопари для контролю перепаду температур між зондами. У якості вимірювальних зондів можуть бути використані однакові гілки термопар, тоді від двох додаткових потенціальних зондів можна відмовитись.

Через зразок пропускається постійний електричний струм величиною I . Напрямок струму вибирається таким чином, щоб охолоджуюча дія ефекту Пельтьє виявлялась на контакті зразка з нагрівником, а нагріваюча – на контакті з термостатом. За допомогою пропускання струму через електричний нагрівник добиваються рівності температур між термопарами. Після цього вимірюється спад напруги U між зондами. Електропровідність матеріалу зразка визначається за формулою

$$\sigma = \frac{I l}{U S}, \quad (1)$$

де S – площа поперечного перерізу зразка, l – відстань між вимірювальними зондами.

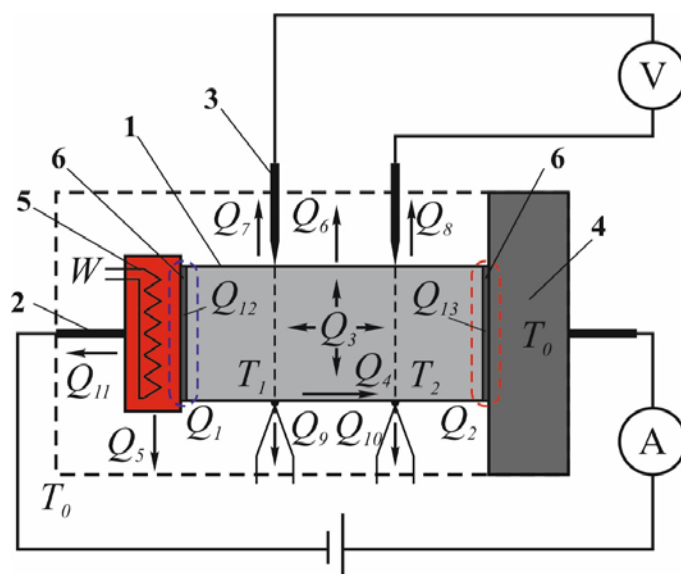


Рис. 1. Фізична модель двозондового методу вимірювання електропровідності термоелектричного матеріалу з компенсацією впливу ефекту Пельтьє теплом електричного нагрівника. 1 – досліджуваний зразок термоелектричного матеріалу; 2 – струмопідводи; 3 – вимірювальні зонди; 4 – термостат; 5 – електричний нагрівник; 6 – контактні опори.

У фізичній моделі враховано теплоти $Q_1 - Q_{13}$, які мають місце при проведенні вимірювань. Це: тепло Пельтьє на контактах зразка з термостатом та нагрівником; тепло Джоуля, що виділяється у зразку; тепло Джоуля, що виділяється на контактних електричних опорах; теплообмін нагрівника з термостатом шляхом випромінювання; теплообмін зразка з термостатом шляхом випромінювання; теплообмін шляхом теплопровідності через провідники термопар, струмопідводи, притискний механізм тощо.

Для дослідження ефективності такого методу вимірювань необхідно знайти розподіли електричного потенціалу φ та температури T у зразку, що можна зробити, виходячи з законів збереження електричного заряду

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \tag{2}$$

та енергії

$$\operatorname{div} \mathbf{w} = 0, \tag{3}$$

де \mathbf{w} – густина потоку енергії

$$\mathbf{w} = \mathbf{q} + \varphi \mathbf{j}, \tag{4}$$

\mathbf{q} – густина потоку тепла

$$\mathbf{q} = -\kappa \nabla T + \alpha T \mathbf{j}, \tag{5}$$

\mathbf{j} – густина електричного струму

$$\mathbf{j} = -\sigma \nabla \varphi - \sigma \alpha \nabla T. \tag{6}$$

α , σ , κ – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності та теплопровідності.

Підставивши (5) і (6) в (4), отримаємо

$$\mathbf{w} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha \sigma \varphi) \nabla T - (\alpha \sigma T + \sigma \varphi) \nabla \varphi. \tag{7}$$

Після підстановки (6), (7) у (2), (3) закони збереження електричного заряду та енергії набудуть такого вигляду:

$$\begin{cases} -\nabla((\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha \varphi \sigma) \nabla T) - \nabla((\alpha \sigma T + \varphi \sigma) \nabla \varphi) = 0, \\ -\nabla(\sigma \nabla \varphi) - \nabla(\sigma \alpha \nabla T) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Розв'язавши систему (8) з відповідними граничними умовами, отримаємо розподіли електричного потенціалу та температури у зразку. Для розрахунків були використані комп'ютерні методи об'єктно-орієнтованого моделювання, зокрема, пакет прикладних програм COMSOL Multiphysics [9].

Результати комп'ютерних розрахунків розподілів електричного потенціалу та температури у зразку. Похибки вимірювань.

Для перевірки ефективності запропонованого методу усунення впливу ефекту Пельтьє було проведено комп'ютерні розрахунки розподілів температури та електричного потенціалу у зразку. Розглядався зразок термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te* діаметром 6 та довжиною 12 мм. Вимірювальні зонди розміщені на бічній поверхні зразка на відстані 5 мм один від одного та симетрично відносно кінців зразка.

На рис. 2 наведено залежність перепаду температур між вимірювальними зондами від величини струму, що пропускається через зразок, для випадку, коли еталонний нагрівник вимкнено. Похибка вимірювань електропровідності при цьому може досягати 40%.

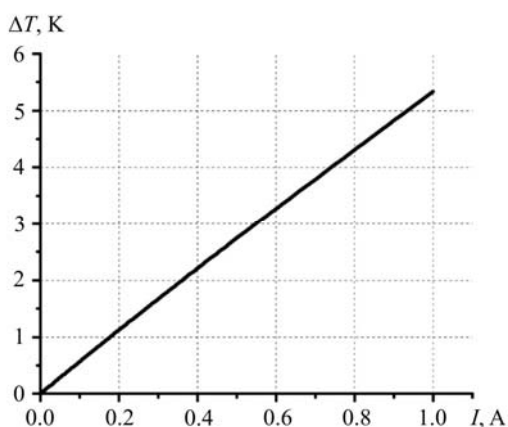


Рис. 2. Залежність перепаду температур між вимірювальними зондами від величини струму, що пропускається через зразок.

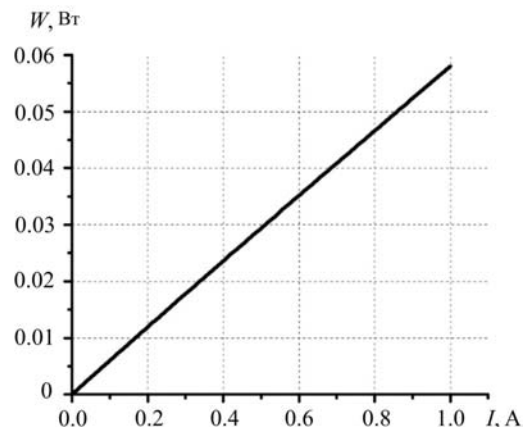


Рис. 3. Залежність потужності електричного нагрівника, необхідної для компенсації впливу ефекту Пельтьє, від величини струму, що пропускається через зразок.

Для усунення цієї похибки охолоджуюча дія ефекту Пельтьє компенсується теплом електричного нагрівника. Залежність необхідної потужності нагрівника від величини струму, що пропускається через зразок, наведена на рис. 3. Розподіли електричного потенціалу та температури вздовж зразка для різних значень струму через зразок показано на рис. 4.

Важливим фактором, що впливає на точність вимірювань при використанні компенсації ефекту Пельтьє теплом еталонного нагрівника, є точність вирівнювання температур між зондами. На рис. 5 наведено залежність похибки вимірювання електропровідності від величини струму через зразок для різних рівнів точності вирівнювання температур між зондами. Як видно, для досягнення зменшення похибки вимірювань нижче 1 – 1.5 % потрібно забезпечити рівність температур між зондами на рівні не гірше 0.05-0.1 К.

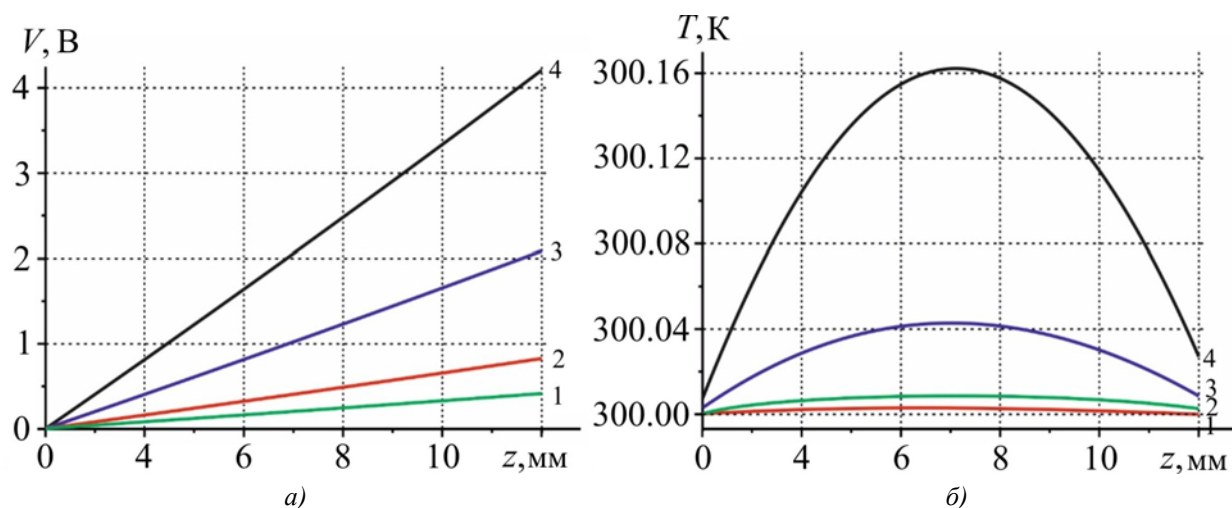


Рис. 4. Розподіли електричного потенціалу (а) та температури (б) вздовж зразка при використанні компенсації тепла Пельтьє теплом еталонного нагрівника для різних значень струму, що пропускається через зразок.

1 – $I = 0.1$; 2 – $I = 0.2$; 3 – $I = 0.5$; 4 – $I = 1$ А;

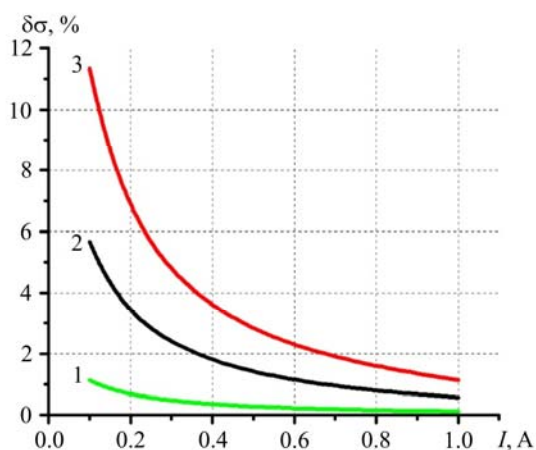


Рис. 5. Залежність похибки вимірювання електропровідності від величини струму, що пропускається через зразок для різних значень точності вирівнювання температур між зондами:

1 – 0.01; 2 – 0.02; 3 – 0.05 К.

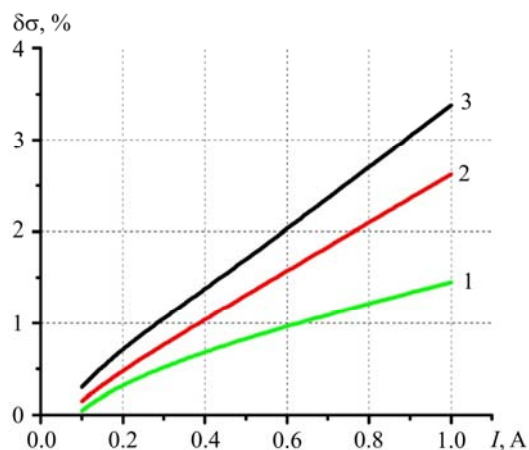


Рис. 6. Залежність похибки вимірювання коефіцієнту термоЕРС від величини струму, що пропускається через зразок для різних значень температури термостату.

1 – $T_0 = 300$; 2 – $T_0 = 500$; 3 – $T_0 = 700$ К.

Розглянутий метод компенсації впливу ефекту Пельтьє дозволяє реалізувати також визначення коефіцієнту термоЕРС зразка, виходячи із співвідношення Томсона

$$Q_{II} = \alpha IT = W, \tag{9}$$

$$\alpha = \frac{IT}{W}. \tag{10}$$

Точність такого методу визначення коефіцієнту термоЕРС буде визначатись співвідношенням теплових потоків у зразку та теплообміном зразка та еталонного нагрівника з

термостатом. Залежності похибки вимірювання термоЕРС від струму через зразок для різних значень температури термостату наведено на рис. 6. Як видно, для достатньо широкого температурного інтервалу та діапазону використовуваних струмів точність вимірювань термоЕРС таким методом може бути на рівні 1-2%. Отже, такий метод може бути корисним як ще один незалежний метод визначення коефіцієнту термоЕРС спільно з вимірюваннями електропровідності.

Висновки

1. Розглянуто можливість усунення впливу ефекту Пельтьє шляхом компенсації охолоджуючої дії ефекту Пельтьє теплом електричного нагрівника. За допомогою комп'ютерного моделювання підтверджено ефективність застосування такого методу. Встановлено, що для досягнення зменшення похибки вимірювань нижче 1 – 1.5 % потрібно забезпечити рівність температур між зондами на рівні не гірше 0.05 – 0.1 К.
2. Показано, що метод компенсації впливу ефекту Пельтьє теплом електричного нагрівника дозволяє реалізувати також визначення коефіцієнту термоЕРС зразка, виходячи із співвідношення Томсона. Точність вимірювань термоЕРС таким методом знаходиться на рівні 1 – 2 % для інтервалу температур від кімнатної до 700К.

Література

1. L.I. Anatyshuk, M.V. Havryliuk, V.V. Lysko. Absolute method for measuring of thermoelectric properties of materials // *Materials Today: Proceedings*, №2, 2015, pp. 737 – 743.
2. Анатышук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. – К.: Наук. думка, 1978. – 768 с.
3. H. Czichos, T. Saito, L. Smith. *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*. – Springer, 2006. – 1207 p.
4. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Високоточний метод вимірювання електропровідності стрижнів термоелектричних матеріалів // *Термоелектрика* – 2008. – №1. – С. 70-75.
5. Л.І. Анатичук, В.В. Лисько, М.В. Гаврилюк, В.А. Тюменцев. Автоматизоване обладнання для вимірювання властивостей стрижнів термоелектричних матеріалів // *Термоелектрика*, №5, 2015.
6. Охотин А.С., Пушкарский А.С., Боровикова Р.П., Симонов В.А. Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. – М. : Наука, 1974. – 167с.
7. Вайнер А.Л. Термоэлектрические параметры и их измерение. – Одесса: Негоциант, 1998. – 68 с.
8. R.J. Buist. A new methodology for testing thermoelectric materials and devices. *Proc. of the 11th Intern. Conf. on Thermoelectrics*, Arlington, Texas, 1992, p. 196-209.
9. Martin Jaegle. *Multiphysics Simulation of Thermoelectric Systems*. – *Proceedings of the COMSOL Conference*, 2008, Hannover.

Надійшла до редакції 18.09.2017

Анатышук Л.И. *ак. НАН України*,^{1,2}

Лысько В.В. *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

¹Інститут термоелектричності, ул. Науки, 1,
Черновці, 58029, Україна *e-mail: anatykh@gmail.com*;

²Черновицький національний університет імені Юрія Федьковича,
ул. Коцюбинського 2, Черновці, 58012, Україна
e-mail: anatykh@gmail.com

МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ДВУХЗОНДОВЫМ МЕТОДОМ

Приведено описання методу усунення впливу ефекта Пельтье при вимірюванні електропровідності термоелектричних матеріалів двозондовим методом шляхом компенсації охолоджуючого дії ефекта Пельтье теплом електричного нагрівача. Представлені результати комп'ютерних досліджень ефективності застосування такого методу і можливих при цьому величин погрешностей. Предложено методика визначення коефіцієнта термоЕДС матеріала, виходячи з співвідношення Томсона. Бібл. 9, Рис. 6.

Ключевые слова: електропровідність, ефект Пельтье, погрешність, термоелектричний матеріал.

L.I. Anatykhuk^{1,2} *acad. National Academy of Sciences of Ukraine,*
V.V. Lysko^{1,2} *Candidate Phys.-math. Sciences*

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str, Chernivtsi, 58029, Ukraine; *e-mail: anatykh@gmail.com*;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsiubynskiy str.,
Chernivtsi, 58012, Ukraine, *e-mail: anatykh@gmail.com*

METHOD FOR COMPENSATION OF THE INFLUENCE OF THE PELTIER EFFECT WHEN MEASURING THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY BY TWO-PROBE METHOD

This paper describes the method for elimination of the influence of the Peltier effect when measuring the electrical conductivity of thermoelectric materials by two-probe method by compensation of the Peltier cooling effect by the heat of electric heater. The results of computer studies of the effectiveness of using such method and possible errors in this case are presented. The method for determining the Seebeck coefficient of material based on the Thomson relation is proposed. Bibl. 9, Fig. 6.

Key words: electric conductivity, the Peltier effect, error, thermoelectric material.

References

1. Anatykhuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2015). Absolute method for measuring of thermoelectric properties of materials. *Materials Today: Proceedings*, 2, 737 – 743.

2. Anatyshuk L.I. (1978). *Termoelementy i termoelektricheskiie ustroistva [Thermoelements and thermoelectric devices]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
3. Czichos H., Saito T., Smith L. (2006). *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*. Springer.
4. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2008). Vysokotochnyi metod vymiryuvannya elektroprovodnosti stryzhniv termoelektrychnykh materialiv [High-precision method for measuring electrical conductivity of thermoelectric material rods]. *Termoelektryka – J.Thermoelectricity*, 1, 70 – 75 [in Ukrainian].
5. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V., Tiumentsev V.A. (2015). Automated equipment for measurement of properties of thermoelectric material rods. *Termoelektryka – J.Thermoelectricity*, 5.
6. Okhotin A.S., Pushkarskii A.S., Borovikova R.P., Simonov V.A. (1974). *Metody izmereniia kharaktersitik termoelektricheskikh materialov i preobrazovatelei [Methods for measuring characteristics of thermoelectric materials and converters]*. Moscow: Nauka [in Russian].
7. Vainer A.L. (1998). *Termoelektricheskiie parametry i ikh izmereniie [Thermoelectric parameters and their measurement]*. Odessa: Negotsiant [in Russian].
8. Buist R.J. (1992). A new methodology for testing thermoelectric materials and devices. *Proc. of the 11th Intern. Conf. on Thermoelectrics* (Arlington, Texas, 1992) (p. 196 – 209).
9. Jaegle Martin (2008). Multiphysics Simulation of Thermoelectric Systems. *Proc. of the COMSOL Conference* (Hannover, 2008).

Submitted 18.09.2017