

ТЕРМОЕЛЕКТРИКА

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Заснований у грудні 1993 р.,
видається 6 разів на рік

№ 6

2018

Редакційна колегія

Головний редактор Л.І. АНАТИЧУК

П.І. Баранський

Б.І. Стадник

Л.М. Вихор

О.Я. Лусте

В.В. Лисько

О.І. Рогачова

С.В. Мельничук

А.О. Снарський

Міжнародна редакційна рада

Л.І. Анатичук, *Україна*

А.І. Касіян, *Молдова*

С.П. Ашмонтас, *Литва*

Т. Кадзікава, *Японія*

Ж.К. Теденак, *Франція*

Т. Трітт, *США*

Х.Дж. Голдсмід, *Австралія*

С.О. Філін, *Польща*

Л. Чен, *Китай*

Д. Шарп, *США*

Т. Кайя, *США*

Ю.Г. Гуревич, *Мексика*

Ю. Грін, *Німеччина*

Засновники – Національна академія наук України,
Інститут термоелектрики Національної академії
наук та Міністерства освіти і науки України

Свідоцтво про державну реєстрацію – серія КВ № 15496-4068 ПР

Редактори

В.М. Крамар, П.В. Горський, О.Я. Лусте, Т.Г. Подбегаліна

Схвалено до друку Вченою радою Інституту термоелектрики
Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України

Адреса редакції:

Україна, 58002, м. Чернівці, Головноштамт, а/с 86

Тел. : + (380-372) 90 31 65.

Факс : +(380-3722) 4 19 17

E-mail: jt@inst.cv.ua

<http://www.jt.inst.cv.ua>

Підписано до друку: 26.12.2018 Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк
офсетний. Ум. друк. арк. 11.5. Обл.-вид. арк. 9.2. Наклад 400 прим. Замовлення 4.

Надруковано з оригінал-макету, виготовленого редакцією журналу «Термоелектрика»,
у типографії видавництва “Букрек”,
Україна, 58000, м. Чернівці, вул. Радищева, 10.

© Інститут термоелектрики Національної академії
наук та Міністерства освіти і науки України, 2018

ЗМІСТ

Конструювання

Анатичук Л.І., Лисько В.В. Вимірювання температурних залежностей термоелектричних параметрів матеріалів в умовах неперервної зміни температури 5

Анатичук Л.І., Прибила А.В. Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності, однокаскадними термобатареями та акумуляторами електричної енергії 17

Метрологія і стандартизація

Ацеулов А.А., Романюк І.С. Пристрій для безконтактного експрес-контролю ефективності анізотропних термоелектричних матеріалів 27

Термоелектричні вироби

Кобилянський Р.Р., Маник О.М., Вигонний В.Ю. Про використання термоелектричного охолодження для кріодеструкції у дерматології 37

Анатичук Л.І., Максимук М.В., Прибила А.В., Розвер Ю.Ю., Романюк І.Ф. Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності, та термосифонами 47

Кузь Р.В. Термоелектричні генератори для транспортних засобів. Аналіз практичних досягнень 56

УДК 53.082

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



Анатичук Л.І.

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

²Чернівецький національний університет імені Юрія
Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна



Лисько В.В.

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ НЕПЕРЕРВНОЇ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ

Наведено результати комп'ютерних досліджень, направлених на підвищення швидкодії при визначенні термоелектричних параметрів матеріалів абсолютним методом. Розглянуто можливість підвищення швидкодії шляхом проведенням вимірювань в умовах неперервного монотонного розігріву вимірювального термостату. Проведено аналіз похибок при вимірюваннях теплопровідності для такого випадку та встановлено умови їх мінімізації. Визначено, що вимірювання в умовах неперервної зміни температури при врахуванні теплоємностей досліджуваного зразка та еталонного нагрівника дозволяють у 3-5 разів зменшити час, необхідний на вимірювання температурних залежностей термоелектричних параметрів зразка, при незначному, до 0.5 – 1 %, збільшенні похибок вимірювань. Бібл. 8, рис. 4.

Ключові слова: вимірювання, електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, добротність, похибки, швидкодія.

Вступ

Загальна характеристика проблеми.

Створення термоелектричних матеріалів, ефективних у різних інтервалах температур є однією з важливих задач термоелектрики [1 – 3]. Для її вирішення необхідні високоточні методи і обладнання для вимірювань температурних залежностей термоелектричних параметрів матеріалів.

У роботах [4 – 7] показано, що для забезпечення високої точності вимірювань найбільш ефективним є абсолютний метод. Однак, при його застосуванні проблемною є швидкодія вимірювань. Необхідність досягнення стаціонарних умов викликає збільшення тривалості вимірювань. Так, для вимірювання температурної залежності одного зразка в інтервалі температур 30 - 550 °С необхідно до 20 годин.

У роботі [8] розглянуто можливість підвищення швидкодії при використанні абсолютного

методу шляхом застосування імпульсів змінного струму для пришвидшення досягнення стаціонарних умов у досліджуваних зразках, а також програмованого форсованого розігріву зразка та термостату. Такі методи дозволяються у 3-5 разів зменшити час, необхідний на вимірювання температурної залежності термоелектричних параметрів зразка, однак вимагають складних алгоритмів вимірювань для своєї реалізації.

Метою даної роботи було дослідження можливості підвищення швидкодії абсолютного методу шляхом проведення вимірювань в умовах неперервного монотонного розігріву вимірювального термостату.

Фізична модель та її математичний опис. Комп'ютерна модель

Досліджуваний зразок прикріплений однією стороною до вимірювального термостату, як це показано на рис. 1. Температура термостату T_0 монотонно зростає, починаючи від кімнатної. Для цього на фоновий нагрівник термостату подається електрична потужність W_0 , величина якої є функцією часу. До другої сторони зразка підводиться тепло постійною потужністю Q від еталонного нагрівника.

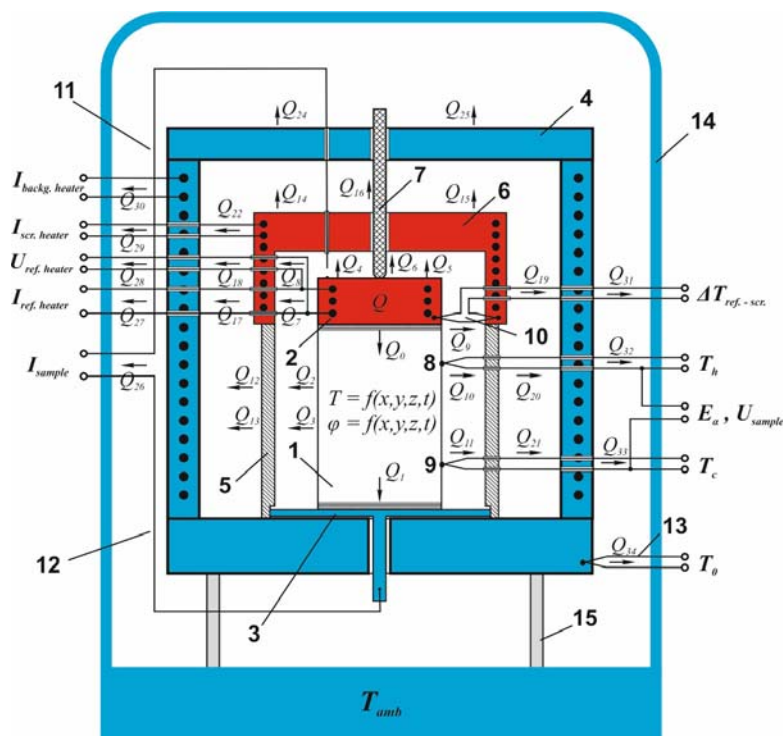


Рис. 1. Фізична модель комплексного абсолютного методу для дослідження факторів, що впливають на швидкість переходу від однієї температурної точки до іншої. 1 – досліджуваний зразок; 2 – еталонний нагрівник; 3 – посадочна площадка; 4 – термостат; 5 – екран; 6 – нагрівник екрану; 7 – притиск; 8, 9 – вимірювальні зонди-термопари; 10 – нуль-термопара; 11, 12 – струмопідводи зразка; 13 – термопара термостату; 14 – зовнішній термостат (вакуумний ковпак); 15 – стійки, на яких вимірювальний термостат кріпиться у зовнішньому пасивному термостаті.

У фізичній моделі, наведеній на рис. 1: Q – тепло, що виділяється еталонним електричним нагрівником при пропусканні через нього струму; Q_0 – тепло, що надходить від еталонного нагрівника до зразка; Q_1 – тепло, що передається від зразка до термостату; Q_2 – тепловий потік між поверхнями зразка та градієнтного теплового екрану шляхом випромінювання; Q_3 – тепловий потік між поверхнями зразка та градієнтного теплового екрану шляхом конвекції; Q_4 – тепловий потік між поверхнями еталонного нагрівника та нагрівника екрану шляхом випромінювання; Q_5 – тепловий потік між поверхнями еталонного нагрівника та нагрівника екрану шляхом конвекції; Q_6 – тепловий потік між поверхнями еталонного нагрівника та нагрівника екрану через притиск; Q_7 та Q_8 – тепловий потік між поверхнями еталонного нагрівника та нагрівника екрану через струмові та потенціальні провідники еталонного нагрівника; Q_9 – тепловий потік між поверхнями еталонного нагрівника та нагрівника екрану через провідники нуль-термопари; Q_{10} та Q_{11} – тепловий потік між поверхнями зразка та градієнтного теплового екрану через провідники зондів-термопар; Q_{12} – тепловий потік між поверхнями градієнтного теплового екрану та термостату шляхом випромінювання; Q_{13} – тепловий потік між поверхнями градієнтного теплового екрану та термостату шляхом конвекції; Q_{14} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату шляхом випромінювання; Q_{15} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату шляхом конвекції; Q_{16} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату через притиск; Q_{17} та Q_{18} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату через струмові та потенціальні провідники еталонного нагрівника; Q_{19} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату через провідники нуль-термопари; Q_{20} та Q_{21} – тепловий потік між поверхнями градієнтного теплового екрану та термостату через провідники зондів-термопар; Q_{22} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату через струмові провідники нагрівника екрану; Q_{23} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату через струмопідвід, Q_{24} – тепловий потік між поверхнями вимірювального термостату та зовнішнього пасивного термостату шляхом випромінювання, Q_{25} – тепловий потік між поверхнями вимірювального термостату та зовнішнього пасивного термостату шляхом конвекції, Q_{26} – тепловий потік між поверхнями вимірювального термостату та зовнішнього пасивного термостату через провідники (зондів-термопар, нуль-термопари, потенціальних та струмових електродів еталонного нагрівника та нагрівника екрану тощо).

Вимірювальний термостат поміщено під ковпак вакуумної установки для усунення теплообміну через повітря шляхом конвекції та теплопровідності.

Для випадку стаціонарного абсолютного методу значення електропровідності σ , коефіцієнту термоЕРС α , теплопровідності κ та добротності Z досліджуваного зразка визначаються з формул

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

$$\alpha = \frac{E_{\alpha}}{T_h - T_c}, \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{W}{T_h - T_c} \frac{l}{S}, \quad (3)$$

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad (4)$$

де S – площа поперечного перерізу зразка; I , U – струм через зразок та спад напруги на ньому при вимірюванні електропровідності; E_{α} – термоЕРС; T_h і T_c – «гаряча» та «холодна» температури на кінцях зразка.

Відсутність стаціонарних умов при проведенні вимірювань викликати похибки, в першу чергу при визначенні теплопровідності. Для дослідження величин цих похибок необхідно знайти часову залежність розподілу температури у досліджуваному зразку. Для цього необхідно для кожного елемента фізичної моделі, наведеної на рис. 1, розв'язати систему диференціальних рівнянь з відповідними граничними умовами, записану у вигляді

$$\begin{cases} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \left((\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha \varphi \sigma) \nabla T \right) - \nabla \left((\alpha \sigma T + \varphi \sigma) \nabla \varphi \right) = 0, \\ \nabla \left(\varepsilon \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) - \nabla (\sigma \nabla \varphi) - \nabla (\sigma \alpha \nabla T) = 0. \end{cases}, \quad (5)$$

де α – коефіцієнт термоЕРС, σ – електропровідність, κ – теплопровідність, ρ – густина, C – теплоємність, ε – діелектрична проникність.

Граничні умови для випадку вимірювання при певній заданій температурі термостату T_0 можуть бути записані у наступному вигляді:

– бічна поверхня зразка

$$r = \frac{d}{2}, \quad z \in [0; l]: q = \varepsilon_1 (G_1 - \sigma T^4); \quad (6)$$

– бічна поверхня еталонного нагрівника

$$r = \frac{d}{2}, \quad z \in [l; l + l_2]: q = \varepsilon_2 (G_2 - \sigma T^4); \quad (7)$$

– верхня поверхня еталонного нагрівника

$$r = \left[0; \frac{d}{2} \right], \quad z \in l + l_2: q = \varepsilon_3 (G_3 - \sigma T^4); \quad (8)$$

– внутрішня поверхня екрану

$$r = \frac{d}{2} + \Delta R, \quad z \in [0; l]: \quad q = \varepsilon_3 (G_4 - \sigma T^4); \quad (9)$$

– внутрішня поверхня нагрівника екрану

$$r = \frac{d}{2} + \Delta R, \quad z \in [l; l + l_4]: \quad q = \varepsilon_4 (G_5 - \sigma T^4); \quad (10)$$

$$r \in \left[0; \frac{d}{2} + \Delta R \right], \quad z = l + l_2 + \Delta R: \quad q = \varepsilon_4 (G_6 - \sigma T^4); \quad (11)$$

– зовнішня поверхня нагрівника екрану

$$r = \frac{d_4}{2}, \quad z \in [l; l = l_4]: \quad q = \varepsilon_4 (G_7 - \sigma T^4); \quad (12)$$

$$r \in \left[0; \frac{d}{2} + \Delta R \right], \quad z = l + l_4: \quad q = \varepsilon_4 (G_8 - \sigma T^4), \quad T = T_0 + \Delta T; \quad (13)$$

– зовнішня поверхня екрану

$$r = \frac{d_3}{2}, \quad z \in [0; l]: \quad q = \varepsilon_3 (G_9 - \sigma T^4); \quad (14)$$

– поверхня термостату між зразком і екраном

$$r \in \left[\frac{d}{2}; \frac{d}{2} + \Delta R \right], \quad z = 0: \quad q = \varepsilon_5 (G_{10} - \sigma T^4); \quad (15)$$

– поверхня термостату з зовнішньої сторони екрану

$$r \in \left[\frac{d_3}{2}; \frac{d_5}{2} \right], \quad z = 0: \quad q = \varepsilon_5 (G_{11} - \sigma T^4); \quad (16)$$

$$r \in \left[0; \frac{d_5}{2} \right], \quad z = l_5: \quad q = \varepsilon_5 (G_{12} - \sigma T^4); \quad (17)$$

$$r = \frac{d_5}{2}, \quad z \in [0; l_5]: \quad q = \varepsilon_5 (G_{13} - \sigma T^4); \quad (18)$$

– зовнішня поверхня термостату

$$r \in \left[0; \frac{d_5}{2} + h_5 \right], \quad z = -h_5 : T = T_0; \quad (19)$$

$$r \in \left[0; \frac{d_5}{2} + h_5 \right], \quad z = l_5 + h_5 : T = T_0; \quad (20)$$

$$r = \frac{d_5}{2} + h_5, \quad z \in [-h_5; l_5 + h_5] : T = T_0. \quad (21)$$

де T_0 – температура термостата, T_1 – температура нагрівників зразка та екрана, κ_1 – теплопровідність зразка, κ_2 – теплопровідність еталонного нагрівника, κ_3 – теплопровідність екрана, κ_4 – теплопровідність нагрівника екрана, ε_1 – коефіцієнт поглинання поверхні зразка, ε_2 – коефіцієнт поглинання поверхні еталонного нагрівника, ε_3 – коефіцієнт поглинання поверхні екрана, ε_4 – коефіцієнт поглинання поверхні нагрівника екрана, ε_5 – коефіцієнт поглинання поверхні термостата, d_1, l_1 – діаметр і довжина зразка; d_2, l_2 – діаметр і довжина еталонного нагрівника; d_3, l_3 – зовнішній діаметр і довжина екрана; d_4, l_4 – діаметр і довжина нагрівника екрана; d_5, l_5, h_5 – внутрішній діаметр, довжина і товщина термостата; ΔR – відстань між зразком і екраном; σ – постійна Стефана-Больцмана; G – вхідний тепловий потік випромінюванням для кожної окремої границі:

$$G = G_m + F_{amb} \sigma T_{amb}^4, \quad (22)$$

де G_m – величина випромінювання від інших границь елементів вимірювальної установки і зразка; F_{amb} – фактор поля зору, рівний тій його частині, яка не підпадає під дію інших поверхонь; T_{amb} – температури у далековіддалених точках у напрямках, включених до F_{amb} .

Такі задачі знаходження розподілу електричного потенціалу і температури, а також теплових і електричних потоків в досліджуваних зразках важко піддаються аналітичному рішенню через складність геометрії, температурні залежності властивостей зразка і елементів конструкції вимірювального обладнання тощо. Для розрахунку температурних і електричних полів, а також впливу на них різних факторів, можуть бути використані комп'ютерні методи об'єктно-орієнтованого моделювання реальних фізичних моделей. Зокрема, для вирішення таких завдань добре підходить пакет прикладних програм COMSOL Multiphysics.

Коефіцієнт G_m , що залежить від взаємного розташування поверхонь, розраховується введенням в комп'ютерну модель додаткової змінної J , яка задається рівнянням

$$J = (1 - \varepsilon) \{ G_m(J) + F_{amb} \sigma T_{amb}^4 \} + \varepsilon \sigma T^4, \quad (23)$$

яке розв'язується сумісно з іншими рівняннями математичної моделі.

Результати комп'ютерних досліджень

При використанні стаціонарного абсолютного методу для вимірювань термоелектричних параметрів досліджуваного зразка при кожній фіксованій температурі вимірювального термостату необхідно витратити 30-60 хв. При цьому близько $\frac{3}{4}$ часу витрачається на перехід від однієї температури до іншої, а решта $\frac{1}{4}$ – на вимірювання електропровідності, створення стаціонарного градієнту температури на зразку та вимірювання теплопровідності і коефіцієнту термоЕРС.

Таким чином, для дослідження температурної залежності термоелектричних параметрів одного зразка в інтервалі температур від кімнатної до 550 °С з кроком 25 °С необхідно до 20 годин. Це еквівалентно монотонному розігріву вимірювального термостату зі швидкістю приблизно 0.4 К/хв. За допомогою розробленої комп'ютерної моделі можна отримати відповідну часова залежність потужності фонових нагрівників, необхідної для такого монотонного розігріву (рис. 2.). Аналогічні залежності можуть бути отримані і для іншої швидкості монотонного розігріву вимірювального термостату.

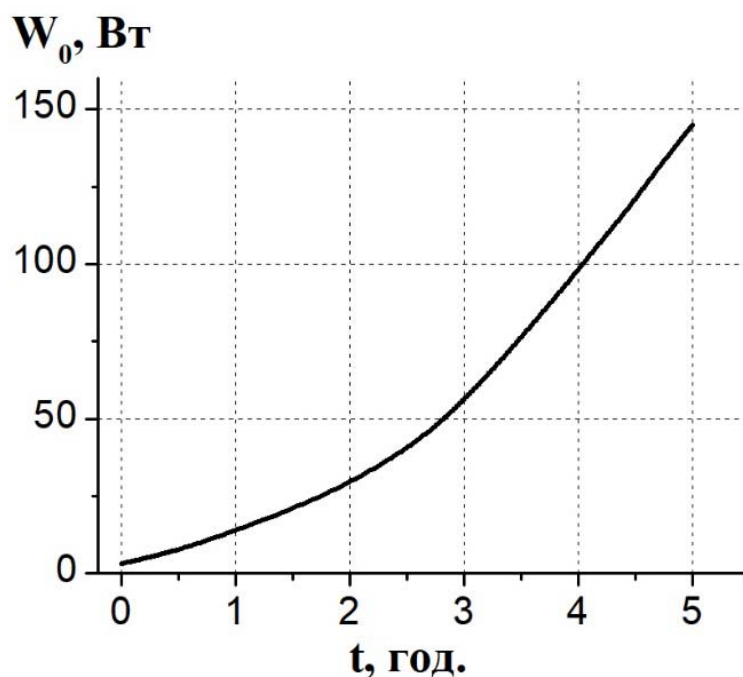


Рис. 2. Часова залежність потужності фонових нагрівників, необхідної для монотонного розігріву термостату від кімнатної температури до 500 °С

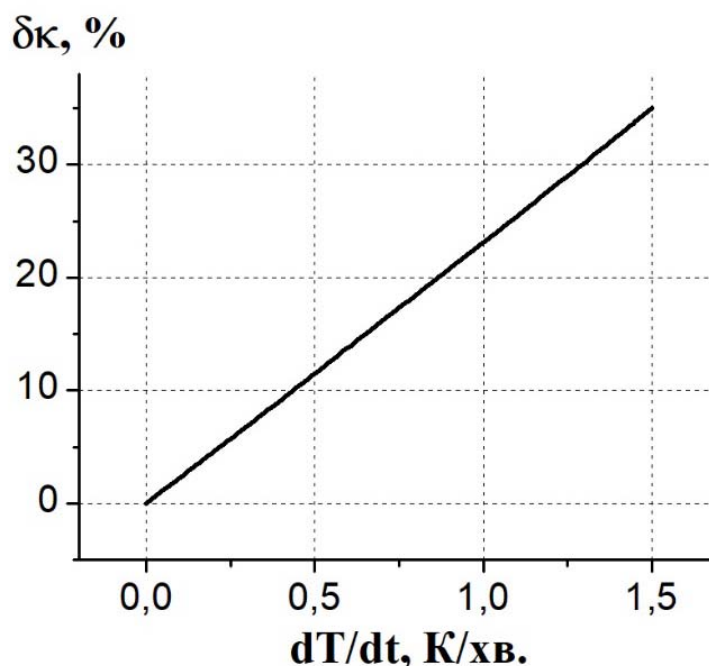


Рис. 3. Залежність похибки вимірювання теплопровідності абсолютним методом в умовах монотонного розігріву від швидкості росту температури термостату

На рис. 3 наведено залежність похибок при визначенні теплопровідності, що виникатимуть через витрати тепла еталонного нагрівника на розігрів зразка та елементів вимірювальної установки. Як видно з рисунка, навіть при швидкості розігріву 0,4 К/хв., що відповідає стаціонарному випадку 1 год. на вимірювання при одній температурі, похибка при вимірюванні теплопровідності буде неприпустимо великою – до 10 %.

Для зменшення похибок і досягнення можливості пришвидшення процесу вимірювань необхідно враховувати величини теплоємностей зразка та елементів вимірювальної установки, зокрема еталонного нагрівника. Для цього для розрахунку потрібно користуватись наступною формулою

$$\kappa = \frac{Q - \left[C_2 m_2 + \frac{1}{2} C_1 m_1 \right] \cdot \frac{dT_h}{dt} l}{T_h - T_c} \frac{1}{S}, \quad (24)$$

де C_1 – теплоємність досліджуваного зразка; C_2 – теплоємність еталонного нагрівника; T_h – температура гарячого кінця зразка (еталонного нагрівника); T_c – температура холодного кінця зразка (термостату); l – довжина зразка; S – площа поперечного перерізу зразка.

При цьому для досягнення високої точності вимірювань при одночасному підвищенні їх швидкодії необхідною буде точна інформація про теплоємності C_1 та C_2 .

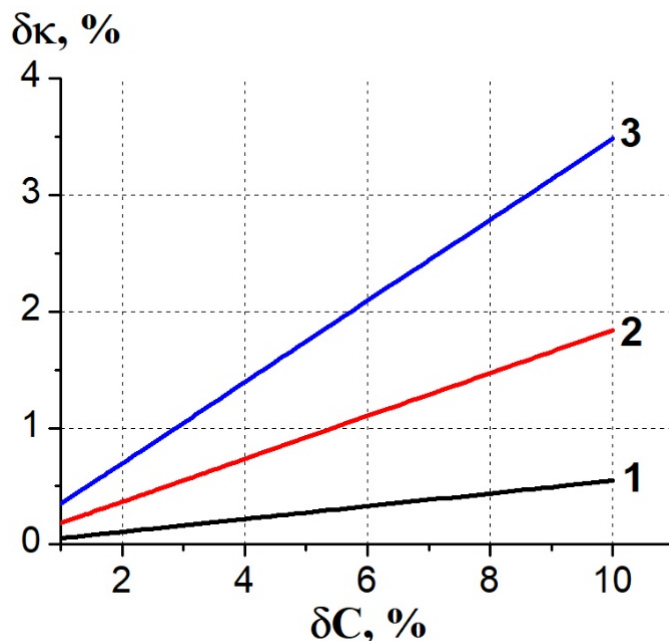


Рис. 4. Залежність похибки вимірювання теплопровідності абсолютним методом в умовах монотонного розігріву від точності інформації про теплоємності досліджуваного зразка та еталонного нагрівника (для різних швидкостей підвищення температури термостату: 1 – 25 К/год; 2 – 75 К/год; 3 – 125 К/год;)

На рис. 4 наведено залежність похибки при вимірюванні теплопровідності абсолютним методом в умовах монотонного розігріву від точності інформації про теплоємності досліджуваного зразка та еталонного нагрівника для різних швидкостей підвищення температури термостату. Залежність 1 на рис. 4 для стаціонарних вимірювань абсолютним методом відповідає вимірюванню при одній температурі за одну годину. Для пришвидшення вимірювань у 3-5 разів (як це можливо у випадку застосування алгоритмів програмованого розігріву вимірювального термостату за допомогою ПД-регуляторів з одночасним підігрівом зразка змінним струмом та теплом еталонного нагрівника) з внесенням додаткової похибки не вище 0.5 % необхідною є інформація про теплоємності зразка та еталонного нагрівника з точністю не гірше 1 – 3 %.

Висновки

1. Створено комп'ютерну модель, яка дозволяє розраховувати часову залежність потужності фонових нагрівників, необхідну для монотонного розігріву вимірювального термостату із заданою швидкістю.
2. Досліджено похибки при вимірюванні теплопровідності абсолютним методом в умовах неперервного зростання температури. Встановлено, що для зменшення похибок і досягнення

можливості пришвидшення процесу вимірювань необхідно враховувати величини теплоємностей зразка та елементів вимірювальної установки, зокрема еталонного нагрівника.

3. Встановлено, що для пришвидшення вимірювань у 3-5 разів із внесенням додаткової похибки не вище 0.5 % необхідна інформація про теплоємності зразка та еталонного нагрівника з точністю не гірше 1 – 3 %.

Література

1. T. Caillat, A. Borshchevsky, J.-P. Fleurial, Search for New High Temperature Thermoelectric Materials, SAE Technical Paper 929424 (1992).
2. Jin-Cheng Zheng, Recent Advances on Thermoelectric Materials, Front. Phys. China 3 (3), 269 – 279 (2008).
3. J.R. Sootsman, D.Y. Chung, and M.G. Kanatzidis, New and Old Concepts in Thermoelectric Materials, Angewandte Chemie International Edition 48 (46), 8616 – 8639(2009).
4. Анатичук Л.І., Гаврилюк М.В., Лисько В.В. Установка для вимірювання властивостей термоелектричного матеріалу // Термоелектрика. – 2010. – № 3. С. 41 – 49.
5. 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.
6. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Дослідження впливу випромінювання на точність вимірювання теплопровідності абсолютним методом // Термоелектрика. – 2012. – № 1. – С. 67 – 76.
7. L.I. Anatyshuk, V.V. Lysko. On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials // Journal of Electronic Materials, 2014, Volume 43, Issue 10, pp 3863-3869.
8. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Про підвищення швидкодії при вимірюванні теплопровідності абсолютним методом, Термоелектрика, №5, 2014.

Надійшла до редакції 03.12.2018

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

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

²Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского 2, Черновці, 58012, Україна

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Приведены результаты компьютерных исследований, направленных на повышение быстродействия при определении термоэлектрических параметров материалов абсолютным методом. Рассмотрена возможность повышения быстродействия путем проведением измерений в условиях непрерывного монотонного разогрева измерительного термостату. Проведен анализ погрешностей при измерениях теплопроводности для такого случая и установлено условия их минимизации. Определено, что измерение в условиях непрерывного изменения температуры при учете теплоемкостей исследуемого образца и эталонного нагревателя позволяют в 3-5 раз уменьшить время, необходимое на измерение температурных зависимостей термоэлектрических параметров образца, при незначительном, к 0.5 – 1 %, увеличении погрешностей измерений. Библи. 8, рис. 4.

Ключевые слова: измерение, электропроводность, термоЕРС, теплопроводность, добротность, погрешности, быстродействие.

L.I. Anatyshuk, *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*^{1,2},

V.V. Lysko *cand phys.-math. sciences*^{1,2}

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

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskiy str., Chernivtsi, 58012, Ukraine,

MEASUREMENT OF THE TEMPERATURE DEPENDENCES OF THERMOELECTRIC PARAMETERS OF MATERIALS UNDER CONDITIONS OF CONTINUOUS TEMPERATURE CHANGE

The results of computer studies aimed at improving performance when defining the thermoelectric parameters of materials by the absolute method are presented. The possibility of performance increase by measurement under conditions of continuous monotonous heating of the measuring thermostat is considered. The analysis of errors in the measurement of thermal conductivity for this case is carried out, and the conditions for their minimization are established. It was determined that measurements under conditions of continuous temperature change with regard to heat capacities of the test sample and the reference heater allow reducing by a factor of 3-5 the time required to measure the temperature dependences of thermoelectric parameters of the sample, with a slight increase to 0.5 - 1% of measurement errors. Bibl. 8, Fig. 4.

Key words: measurement, electrical conductivity, thermoEMF, thermal conductivity, figure of merit, errors, performance.

References

1. Caillat T., Borshchevsky A., Fleurial J.-P. (1992). Search for new high temperature thermoelectric materials. *SAE Technical Paper 929424*.
2. Zheng Jin-Cheng (2008). Recent advances on thermoelectric materials. *Front. Phys. China* 3 (3), 269 – 279.

3. J.R. Sootsman, D.Y. Chung, and M.G. Kanatzidis. (2009). New and old concepts in thermoelectric materials. *Angewandte Chemie International Edition* 48 (46), 8616 – 8639.
4. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2010). Installation for measuring thermoelectric material properties. *J.Thermoelectricity*, 3, 41 – 49.
5. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2015). Absolute method for measuring of thermoelectric properties of materials. *Materials Today: Proceedings*, 2, 737 – 743.
6. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J.Thermoelectricity*, 1, 67 – 76.
7. L.I. Anatyshuk, V.V. Lysko (2014). On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials. *J.Electronic Materials*, 43 (10), 3863-3869.
8. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). Increasing the rapidity of thermal conductivity measurement by the absolute measurement. *J.Thermoelectricity*, 5.

Submitted 03.12.2018



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}

Прибила А.В., *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}

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

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна



Прибила А.В.

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ З ПОЛУМ'ЯНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛА ЗМІННОЇ ПОТУЖНОСТІ, ОДНОКАСКАДНИМИ ТЕРМОБАТАРЕЯМИ ТА АКУМУЛЯТОРАМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

У роботі виконано розрахунки динамічної потужності термоелектричного генератора з полум'яними джерелами тепла змінної потужності. Наводяться результати розрахунків такого генератора виготовленого із термоелектричного матеріалу на основі PbTe – TAGS. Бібл. 5, рис. 3.

Ключові слова: термоелектричний генератор, комп'ютерне проектування, фізична модель.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Полум'яні джерела тепла змінної потужності, зокрема на дровах та пресованих брикетах, широко використовуються для обігріву приміщень і приготування їжі, особливо у віддалених від централізованих мереж районах. Крім того, актуальність їх використання постійно зростає в умовах збільшення вартості газового та рідкого органічних палив.

Використання таких твердопаливних печей, зокрема для приготування їжі, пов'язане із значними втратами тепла у оточуюче середовище. Перспективним є використання термоелектричних генераторів (ТЕГ) для часткового перетворення вказаного тепла в електричну енергію [1 – 3]. Окрім переваг із економічної точки зору, використання нагрітих поверхонь твердопаливних печей в конструкції ТЕГ дозволяє створювати універсальні термоелектричні комбіновані системи тепла та електрики, які в порівнянні з аналогічними термоелектричними системами, що працюють на дизельному, бензиновому чи газовому паливі, мають простішу та водночас надійнішу конструкцію, є безпечнішими та зручнішими в експлуатації [1 – 3].

Одним з чинників, що обмежують широке практичне застосування термоелектричних генераторів, є низька ефективність перетворення теплової енергії в електричну, зумовлена

використанням в конструкції ТЕГ однокаскадних модулів з низьким значенням добротності термоелектричних матеріалів для температур експлуатації твердопаливних печей, а також використання стабілізаторів температури гарячої поверхні генератора, що, з одного боку, забезпечують надійність функціонування ТЕГ, проте призводять до зниження загальної ефективності перетворення енергії [3].

Один із способів підвищення ККД термоелектричного перетворення полягає в розширенні діапазону робочих температур модуля шляхом використання генераторних модулів, оптимізованих на рівень робочих температур 30-600 °С.

Для вказаних температур експлуатації ТЕГ розроблено спеціалізовані термоелектричні модулі із матеріалу на основі $PbTe$ n -типу провідності та $GeTe-AgSbTe$ (TAGS) p -типу провідності [4].

Метою даної роботи є розрахунок динамічних робочих характеристик термоелектричного генератора із джерелами тепла змінної потужності у діапазоні температур 30-600 °С.

Фізична модель

У розрахунках використано фізичну модель блока термоелектричного генератора (рис. 1), яка містить нагріту поверхню джерела тепла змінної потужності 1, теплообмінники для підведення 2 та відведення 5 теплового потоку до/від термоелектричного модуля 3, теплоізоляцію 4, стабілізатор електричної напруги 6 та акумулятор електричної енергії 7.

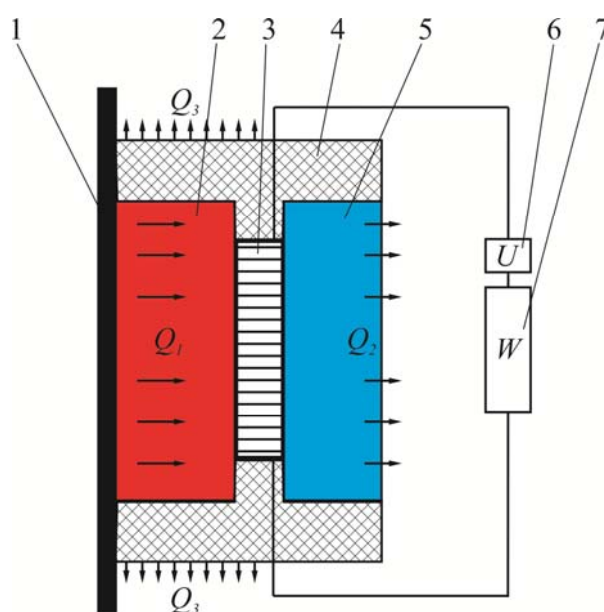


Рис. 1. Фізична модель блока термоелектричного генератора: 1 – нагріта поверхня; 2 – гарячий теплообмінник; 3 – термоелектричний модуль; 4 – теплоізоляція; 5 – холодний теплообмінник; 6 – стабілізатор напруги; 7 – акумулятор електричної енергії.

Оскільки генератор встановлений на нагріту поверхню, у моделі не розглядаються процеси теплопереносу від реального джерела горіння палива до цієї поверхні. Замість цього, для визначення температури нагрітої поверхні I , використовуються експериментальні залежності її температури від часу при реальному циклі використання джерела тепла на твердому паливі [3].

Математичний і комп'ютерний описи моделі

Таким чином, для розрахунку термоелектричного генератора відповідно до фізичної моделі (рис. 1) використано рівняння балансу теплот.

На гарячій стороні міститься джерело тепла змінної потужності $Q_1[T_1(t)]$. Його теплова потужність залежить від температури цієї поверхні T_1 , яка, в свою чергу, змінюється із часом t [3], та подається у вигляді деякої функції $f[T_1(t)]$.

$$Q_1 = f[T_1(t)], \quad (1)$$

Підведення тепла від нагрітої поверхні до гарячої сторони термоелектричного модуля та відведення тепла до холодного теплообмінника описується рівняннями:

$$Q_1 = \chi_1[T_1(t) - T_r], \quad (2)$$

$$Q_2 = \chi_2[T_x - T_2], \quad (3)$$

де χ_1, χ_2 – теплові опори гарячого і холодного теплообмінників; T_r, T_x – температури гарячої та холодної сторони термоелектричного модуля відповідно; T_2 – температура зовнішньої поверхні холодного теплообмінника.

Теплова потужність Q_2 відводиться від холодного теплообмінника шляхом примусової конвекції повітря у навколишнє середовище:

$$Q_2 = \alpha(T_2 - T_0)S_m, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт конвективного теплообміну між поверхнею теплообмінника і навколишнім середовищем; S_m – площа поверхні теплообміну; T_0 – температура навколишнього середовища.

Електрична потужність, яка генерується термоелектричним модулем пропорційна $Q_1[T_1(t)]$ та його ККД η :

$$W = Q_1[T_1(t)] \cdot \eta, \quad (5)$$

Основні втрати тепла Q_3 відбуваються через теплову ізоляцію:

$$Q_3 = \chi_4(T_M - T_0), \quad (6)$$

де χ_4 – тепловий опір ізоляції, T_M – температура внутрішньої поверхні теплової ізоляції.

Таким чином, рівняння теплового балансу для обраної моделі термоелектричного генератора можна записати у вигляді:

$$Q_1 = W + Q_2 + Q_3. \quad (7)$$

Для комп'ютерного представлення математичної моделі ТЕГ використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [5]. Для цього необхідно представити наші рівняння у наступному вигляді.

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (8)$$

й електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (9)$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (10)$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \quad (11)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T. \quad (12)$$

Тут \vec{E} – щільність потоку енергії, \vec{q} – щільність теплового потоку, \vec{j} – щільність електричного струму, U – електричний потенціал, T – температура, α , σ , κ – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності.

Враховуючи (10) – (12), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (13)$$

Тоді закони збереження (8), (9) набувають вигляду:

$$-\nabla [(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla [(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (14)$$

$$-\nabla (\sigma \alpha \nabla T) - \nabla (\sigma \nabla U) = 0. \quad (15)$$

З розв'язку рівняння (14) - (15) ми одержимо розподіли фізичних полів, а також інтегральні значення ефективності та потужності ТЕГ.

Опис динамічних потужностей ТЕГ

Для визначення реальних температурних умов на нагрітих поверхнях пічок із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі (дровах) проведено експериментальні дослідження та визначено залежності температур нагрітих поверхонь пічки від часу, протягом якого із рівними інтервалами відбувалося додавання однакової кількості дров [3].

Отримані дані оброблені у вигляді функціональних залежностей температур нагрітих поверхонь пічки від часу і використані при розрахунках характеристик термоелектричного генератора із полум'яними джерелами тепла змінної потужності на твердому паливі.

Таким чином, використовуючи комп'ютерні методи, проведено розрахунок динамічних потужностей ТЕГ за умов його встановлення на поверхні пічки (рис. 2).

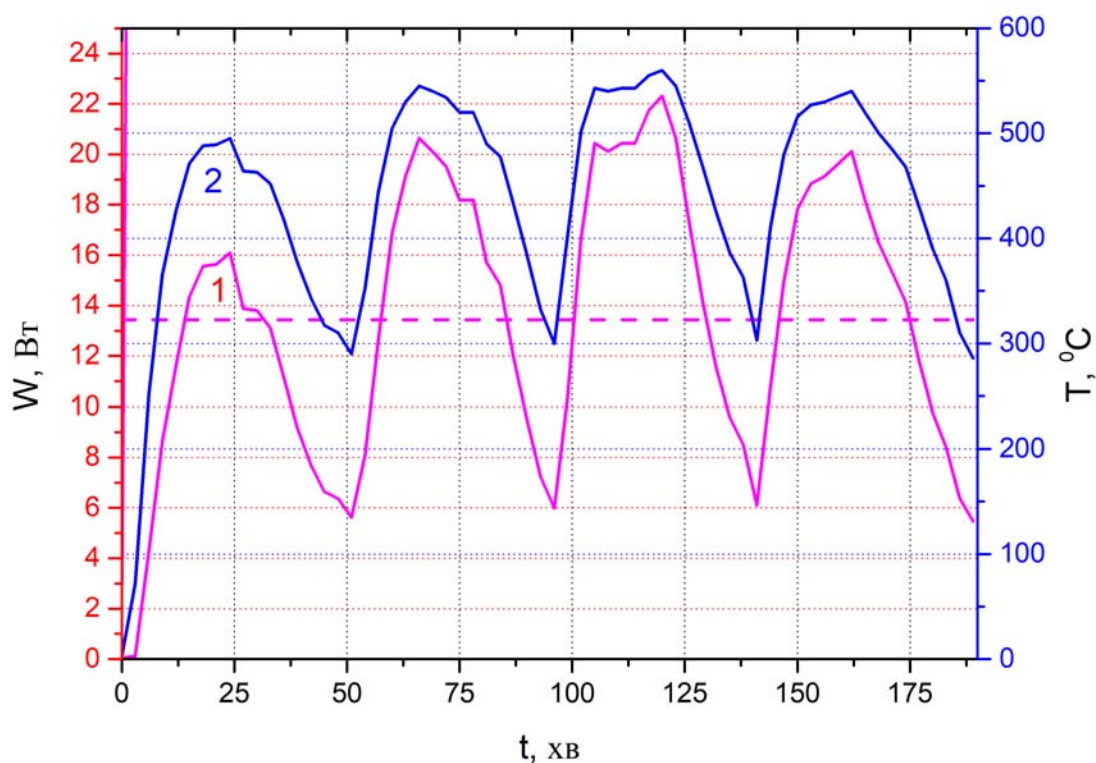
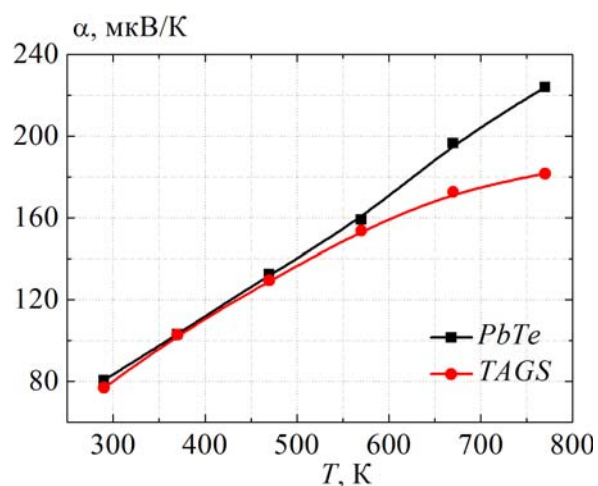
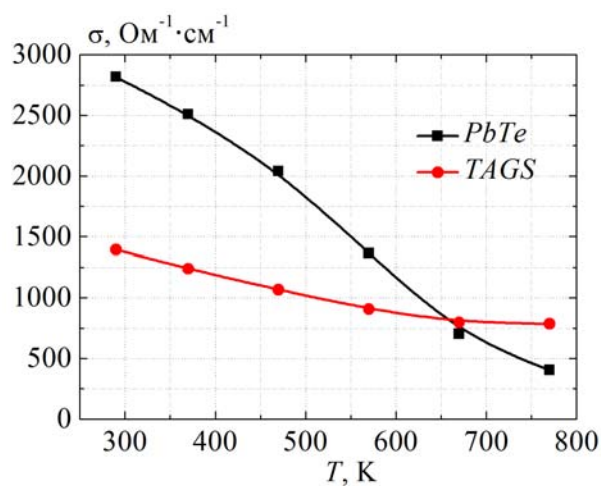


Рис. 2. Залежність потужності ТЕГ розміщеного на задній поверхні пічки від часу: 1 – потужність ТЕГ при $T_x=30^\circ$, 2 – температура поверхні пічки.

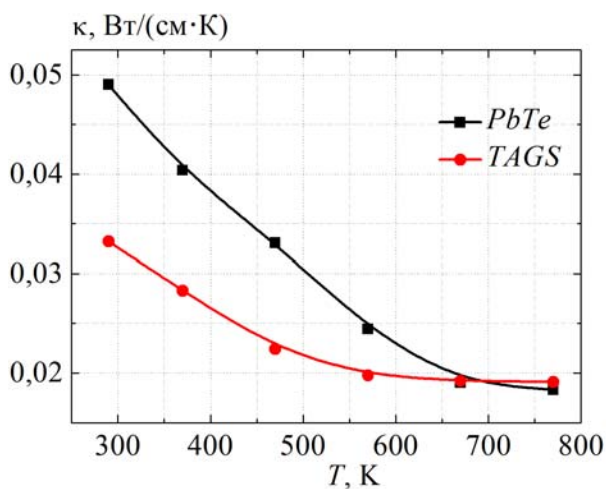
У якості термоелектричних перетворювачів для ТЕГ використано 1 термоелектричний модуль із матеріалу на основі $PbTe$ n -типу провідності та $GeTe-AgSbTe$ (TAGS) p -типу провідності. Характеристики такого матеріалу, виготовленого в Інституті термоелектрики НАН і МОН України, наведено на рис. 3.



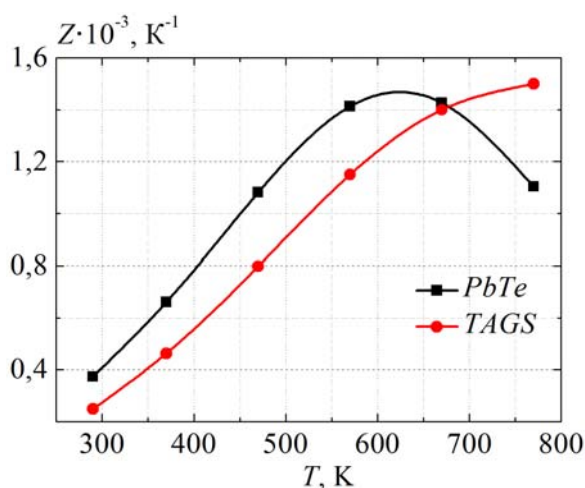
a)



б)



в)



з)

Рис. 3. Температурні залежності термоелектричних матеріалів на основі *n*-PbTe і *p*-TAGS: а) коефіцієнт термоЕРС; б) електропровідність; в) теплопровідність; з) добротність.

На рис. 2 наведено залежність потужності ТЕГ, розміщеного на задній поверхні пічки, від часу для температури холодної сторони ТЕГ $T_x = 30^\circ\text{C}$ (1 на рис. 2). Температура гарячої сторони ТЕГ показана суцільною кривою 2 на рис. 2.

Як видно із рис. 2, характер залежності динамічної потужності від часу в цілому відтворює залежності температури поверхні пічки. Для температури холодної сторони $T_x = 30^\circ\text{C}$ усереднене значення потужності ТЕГ, що складається із одного термоелектричного модуля, за вибраний відрізок часу становить 13.44 Вт. При цьому енергія, що генерується ТЕГ у розрахунку на 1 год, становить ~ 51 кДж.

Отже, вказаний варіант ТЕГ із спеціалізованих матеріалів на основі *PbTe* – TAGS дозволяє підвищити його загальну потужність на $\sim 33\%$ у порівнянні із генератором, що використовує стабілізатори температури гарячої поверхні печі [3].

Якщо проаналізувати криву 1 на рис. 2, стає зрозуміло, що вихідна потужність ТЕГ сильно залежить від температури поверхні печі. В умовах реальної експлуатації ТЕГ, коли середні температури поверхні печі сильно відрізняються від її максимальних значень (крива 2 на рис. 2), це призводить до значних втрат потужності ТЕГ, що складають до $\sim 35\%$.

Отже, для подальшого покращення якості термоелектричних генераторів, що використовують полум'яні джерела тепла змінної потужності на твердому паливі, важливим є дослідження направлені на пошук можливостей більш повного використання теплової потужності печей, зокрема розробка нових конструкцій термоелектричних перетворювачів, що складаються із кількох узгоджених на певні температури каскадів. Такий підхід дозволить підвищити вихідні характеристики ТЕГ, що забезпечить їм переваги в конкурентній боротьбі та розширить можливості їх практичного використання.

Висновки

1. На основі експериментальних даних, розраховано динамічну потужність ТЕГ із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі, що використовують спеціалізовані термоелектричні модулі із матеріалу на основі $PbTe$ n -типу провідності та $GeTe-AgSbTe$ (TAGS) p -типу провідності.
2. Усереднене значення потужності ТЕГ, який складається із одного термоелектричного модуля, встановленого на задній поверхні печі, у заданому часовому відрізку становить 9.5 Вт (за температури його холодної сторони $T_x = 30$ °С), що на 33 % більше у порівнянні із генератором, що використовує стабілізатори температури гарячої поверхні печі.
3. Встановлено, що в динамічному режимі роботи вихідна потужність ТЕГ є нижчою від її максимальних значень на ~ 35 %.
4. Проаналізовано можливості покращення якості термоелектричних генераторів, що використовують полум'яні джерела тепла змінної потужності на твердому паливі, зокрема за рахунок розробки нових конструкцій термоелектричних перетворювачів, що складаються із кількох узгоджених на певні температури каскадів.

Література

1. Анатичук Л.І., Мочернюк Р.М., Гаврилюк М.В., Андрусак І.С. Термоелектричний генератор, що використовує тепло нагрітих поверхонь // Термоелектрика. – 2017. №2. – С 84 – 95.
2. Вихор Л.М., Максимук М.В. Проектування термоелектричних каскадних модулів для ТЕГ на твердому паливі // Термоелектрика. – 2017. №4. – С 40 – 48.
3. Анатичук Л.І., Розвер Ю.Ю., Прибила А.В., Максимук М.В. Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності і стабілізаторами температури термобатарей // Термоелектрика. – 2018. №2. –С. 22-30
4. Михайловський В.Я. Термоелектричні каскадні модулі із матеріалів на основі Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS. / Михайловський В.Я., Білінський-Слотило В.Р. // Термоелектрика, 2012, №4, С. 67-74.
5. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Надійшла до редакції 11.12.2018

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}

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

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України, ул. Науки, 1,
Черновці, 58029, Україна, *e-mail: anatyuch@gmail.com;*

²Черновицький національний університет
ім. Юрія Федьковича, ул. Коцюбинського, 2,
Черновці, 58012, Україна

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПЛАМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА СМЕННОЙ МОЩНОСТИ, ОДНОКАСКАДНЫМИ ТЕРМОБАТАРЕЯМИ ТА АККУМУЛЯТОРАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В работе выполнены расчеты динамической мощности термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла сменной мощности. Приводятся результаты расчетов такого генератора изготовленного из термоэлектрического материала на основе PbTe – TAGS. Библ. 5, рис. 3.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, компьютерное проектирование, физическая модель.

Anatyuchuk L.I., *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*^{1,2}

Prybyla A.V., *cand. Phys.- math. Sciences*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskiy str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

THERMOELECTRIC GENERATORS WITH VARIABLE POWER FLAME HEAT SOURCES, SINGLE-STAGE THERMOPILES AND ELECTRIC ENERGY BATTERIES

In this paper, calculations of the dynamic power of a thermoelectric generator with variable power flame heat sources are made. The results of calculations of such a generator made of thermoelectric material based on PbTe – TAGS are presented. Bibl. 5, Fig. 3.

Key words: thermoelectric generator, computer design, physical model.

References

1. Anatyshuk L.I., Mocherniuk R.M., Havryliuk M.V., Andrusiak I.S. (2017). Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces. *J. Thermoelectricity*, 2, 84 – 95.
2. Vikhor L.M., Maksymuk M.V. (2017). Design of thermoelectric cascade modules for solid fuel TEG. *J. Thermoelectricity*, 4, 40– 48.
3. Anatyshuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V., Maksymuk M.V. (2018). Thermoelectric generators with flame heat sources of variable power and temperature stabilizers for thermopiles. *J. Thermoelectricity*, 2, P. 23-30
4. Mykhailovsky V.Ya., Bilinskyi-Slotylo V.R. (2012). Thermoelectric cascade modules of materials based on Bi₂Te₃-PbTe-TAGS. *J. Thermoelectricity*, 4, 67-74.
5. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010). COMSOLAB, 804p.

Submitted 11.12.2018

УДК 621: 36.5

Ащеулов А.А. докт. техн. наук, професор¹,

Романюк І.С. канд. техн. наук²

Ащеулов А.А.

Романюк І.С.

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,

вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

e-mail: anatysh@gmail.com;

²Завод «Кварц» ТДВ, вул. Головна, 246,

Чернівці, 58000, Україна

ПРИСТРІЙ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНОСТІ АНІЗОТРОПНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Метод ґрунтується на визначенні втрат електричної потужності при протікання вихрових струмів Фуко у термоелектричному зразку, розміщеному в полі дії осердя котушки індуктивності, через яку послідовно протікають симетричний і асиметричний за характером електричні струми. Визначено вирази для коефіцієнтів електропровідності σ , термоЕРС α , теплопровідності κ та добротності Z . Запропонований метод дозволяє автоматизувати процеси контролю і розбракування термоелектричних злитків, заготовок і деталей. Бібл. 11, рис 2.

Ключові слова: вихровий струм Фуко, анізотропні термоелектричні матеріали, термоелектрична добротність, симетрична і асиметрична складові тензора електропровідності

Вступ

Основними параметрами термоелектричного матеріалу є коефіцієнти термоЕРС α , електропровідності σ і теплопровідності κ , а також його ефективність Z [1, 2]. На даний час розроблено достатню кількість методів їх визначення [3, 4], в тому числі і шляхом послідовного вимірювання електропровідності термоелектричного зразка в ізотермічних і адіабатичних умовах [5]. Однак наявність необхідних при таких вимірах електричних контактів з выводами на контрольованих зразках веде до певних незручностей і додаткових похибок.

В [6] показано перспективність вихрострумового методу для випадку безконтактного визначення електропровідності термоелектричних матеріалів при порівняно малій похибці, а пізніше було розроблено реальний пристрій для його реалізації [7].

У даній роботі наведено опис вихрострумового методу, що дозволяє визначати основні параметри анізотропних термоелектричних матеріалів, такі як добротність Z_{ii} , та електропровідності σ_{ii} , а також описано конструкцію пристрою для його реалізації.

Короткий опис методу

Фізичні ефекти взаємодії електромагнітного поля з досліджуваною речовиною, які лежать в основі реалізації вихрострумowego методу для вимірювання параметрів матеріалів, було розглянуто у працях [6-9]. Показано, що в разі розміщення контрольованого зразка в полі дії осердя котушки, через яку протікає змінний асиметричний струм, виникає магнітне поле з індукцією B , що складається із змінної синусоїдальної (B_1) і постійної (B_0) складових. Змінна складова індукує в зразку струм Фуко, кожен напівперіод якого характеризується наявністю власної магнітної індукції. Взаємодія цих складових веде до появи як радіальних, так і осьових складових сил Ампера. Аксиальні складові викликають зміщення струмів Фуко протягом негативного і позитивного напівперіодів до верхньої і нижньої торцевих граней зразка відповідно, а радіальні складові призводять до зміни ефективного радіусу дії магнітного поля R_{ef} . Таке зонально-об'ємне розшарування індукваного струму веде до істотного об'ємного перерозподілу теплових потоків, викликаних ефектами як Джоуля q_{mJ} , так і Пельтьє q_{mP} . Запропонований метод реалізується шляхом визначення втрат електричної потужності у процесі протікання вихрових струмів Фуко в зразку.

Мінімізація інтегральної похибки цього методу проводилася шляхом комп'ютерного моделювання фізичних процесів, що відбуваються при вимірюванні, за допомогою пакета програм ComsolFemlab 3.3. В результаті цих досліджень встановлено, що для термоелектричних матеріалів на основі сполук $Cd-Sb$ [8] робоча частота вимірювального давача міститься в діапазоні 36 - 250 кГц, а струм, що протікає через нього повинен задовольняти умові $q_{mP}/q_{mJ} > 10$. Значення індукції магнітного поля та її складових вибирається з умови $B_0/B_1 > 8.6$, що також відповідає умовам мінімального впливу на параметри зразка внаслідок гальванотермомагнітних явищ [10].

У [8] було показано, що за наявності значень електричної добротності вимірювального контуру без зразка Q_1 і в разі протікання симетричного та асиметричного струмів через зразок (відповідно Q_2 та Q_3) можна визначити усереднені значення симетричною та асиметричною електропровідностей матеріалу σ^s та σ^a :

$$\sigma^{sa} = c \frac{Q_1 - Q_{2,3}}{Q_1 Q_{2,3} d \left(1 + 4 \ln \frac{R_0}{R_{ef}} \right)} \quad (1)$$

[3] термоелектрична добротність Z_{ef} представляється слідом вигляді:

$$Z_m = \frac{\sigma_c}{\sigma^a} \frac{1}{T} \quad (2)$$

де $c = \frac{\pi \omega \mu_0 (\mu_n')^2 R_{ef} I_m}{8 \mu_n' S}$ d - ширина зазору;

R_0 – радіус кільцевого датчика;

T – температура;

ω – кругова частота вимірювального коливального контуру μ_0, μ'_n – динамічні магнітні проникності зразка і феритового осердя контуру відповідно;

l_m – середня довжина магнітної силової лінії;

I_m – струм зміщення феритового датчика.

У разі анізотропного термоелектричного матеріалу, кристалографічні вісі якого збігаються з осями лабораторної системи координат [1, 2, 3], його тензор електропровідності має наступний вигляд:

$$\hat{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (3)$$

Якщо ж кристалографічні осі 1, 2 кристала повернені навколо осі 3 відносно лабораторних осей 1 і 2 на деякий кут φ , то тензор електропровідності набуває вигляду

$$\hat{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi & (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \varphi \cos \varphi & 0 \\ (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \varphi \cos \varphi & \sigma_{11} \sin^2 \varphi + \sigma_{22} \cos^2 \varphi & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (4)$$

і характеризується наявністю як поздовжньої σ_{\parallel} , так і поперечної σ_{\perp} складової, де

$$\sigma_{\parallel} = \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi \quad (5)$$

$$\sigma_{\perp} = (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \varphi \cos \varphi \quad (6)$$

Оптимізація цих величин за кутом φ показує, що їх максимум спостерігається для σ_{11} при $\varphi_1 = 45^\circ$, і $\varphi_2 = 135^\circ$, при цьому $\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varphi} = 0, \frac{\partial^2 \sigma}{\partial^2 \varphi} < 0\right)$

$$\sigma_{\parallel} = 0.5(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (7)$$

$$\sigma_{\perp} = 0.5(\sigma_{11} - \sigma_{22}). \quad (8)$$

Отже, безконтактне вимірювання величин σ_{\parallel} і σ_{\perp} при симетричному та асиметричному характерах електричних струмів вимірювального датчика, розміщеного відповідно під кутами $\varphi_1 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 135^\circ$ дає можливість отримати наступні співвідношення:

$$\sigma_{11}^e = 0.5(\sigma_{\parallel}^e + \sigma_{\perp}^e), \quad (9)$$

$$\sigma_{22}^e = 0.5(\sigma_{\parallel}^e - \sigma_{\perp}^e), \quad (10)$$

$$\sigma_{11}^a = 0.5 (\sigma_1^c + \sigma_1^a), \quad (11)$$

$$\sigma_{22}^a = 0.5 (\sigma_1^c - \sigma_1^a). \quad (12)$$

Підставляючи (11-12) в формулу Харман [2], отримуємо вирази для термоелектричних добротностей Z_{11} та Z_{22} анізотропного термоелектричного матеріалу:

$$Z_{11} = \left(\frac{\sigma_{11}^c + \sigma_{22}^c}{\sigma_{11}^a + \sigma_{22}^a} \right) \cdot T^{-1} \quad (13)$$

$$Z_{22} = \left(\frac{\sigma_{11}^c - \sigma_{22}^c}{\sigma_{11}^a - \sigma_{22}^a} \right) \cdot T^{-1} \quad (14)$$

Таким чином, представлений метод дозволяє безконтактно визначити термоелектричні ефективності Z_{11} та Z_{22} у кристалографічних осях 1, 2 анізотропних термоелектричних матеріалів.

Необхідно зазначити, що вимірюваний зразок повинен бути відповідним чином кристалографічно орієнтованим щодо заданого напрямку вектора магнітної індукції \vec{B} , яка виникає в зазорі вихрострумове датчика [10, 11]. Його необхідно розташовувати так, щоб вибрані кристалографічні осі накладалися в площині торцевої грані. Вимірювання термоелектричних неоднорідних матеріалів проводиться на площині з максимальною неоднорідністю. Вимірювання параметрів термоелектричних однорідних матеріалів проводиться на зразках, виконаних у вигляді двох геометрично однакових зразків, один з яких є еталонним з відомими параметрами, а другий - з контрольованого матеріалу.

Особливості конструкції пристрою для безконтактного визначення ефективності Z_{ii} анізотропних термоелектричних матеріалів

З метою реалізації запропонованого вихрострумове безконтактного методу було проведено модернізацію пристрою, описаного в [1, 7]. Цей пристрій дозволяє безконтактно вимірювати усереднене значення не лише симетричної електропровідності σ^s , але і асиметричної σ^a , необхідні для подальшого визначення параметрів анізотропних термоелектричних матеріалів. З цією метою у вимірювальний давач пристрою накладного типу введено додаткову індуктивність. Сталий струм, який протікає через неї, створює в робочому зазорі давача сталі підмагнічує поле, яке зумовлює необхідні фізичні процеси в об'ємі контрольованого зразка. Однак, в той же час, це поле впливає і на характеристики матеріалу феромагнітного осердя вимірювального давача, змінюючи його індуктивність та величину електромагнітного зв'язку з контрольованим зразком. Відповідно змінюється і резонансна (робоча) частота давача, а також його чутливість в порівнянні з цими ж параметрами за нульового струму підмагнічування. Ці зміни обумовлюють істотне

спотворення результатів вимірювання основних параметрів термоелектричних матеріалів.

Використання вимірювального давача, схему якого наведено на рис. 1, дозволило усунути залежність його індуктивності від струму підмагнічування.

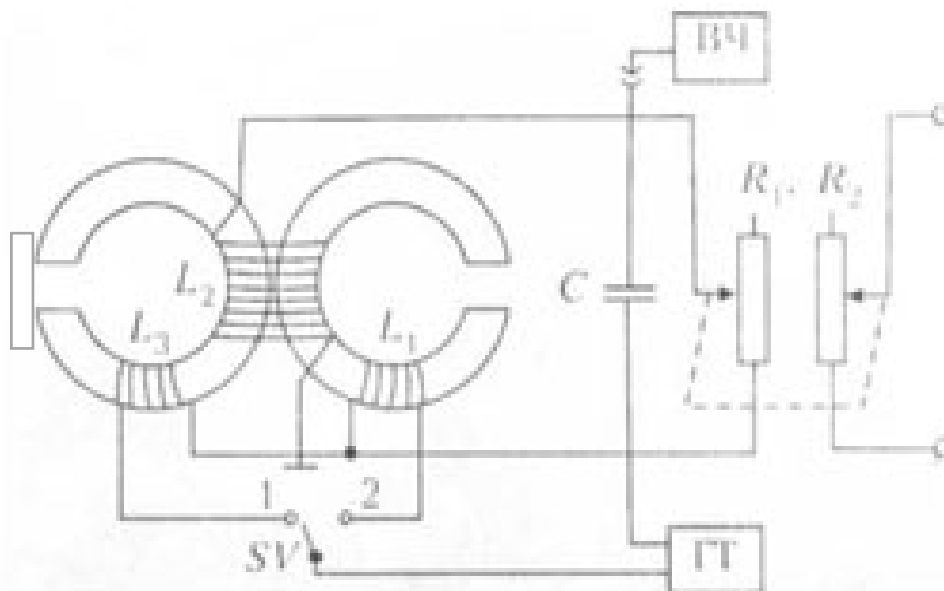


Рис. 1. Схема включення вимірювального давача з підмагнічуванням

Конструктивно цей давач складається з двох ідентичних феритових кілець з котушками подмагнічування L_3 та L_4 , електрично ввімкнених послідовно-зустрічно, а також робочої котушки L_1 , намотаної одночасно на обидва феритових кільця. Індуктивності L_3 і L_4 через перемикач SV під'єднано до генератора сталого струму $ГТ$, а індуктивність L_1 , спільно з конденсатором C утворює паралельний коливальний контур, підключений до генератора високочастотного струму $ВЧ$, робоча частота f_p якого дорівнює резонансній частоті f_0 LC-контур. Спарені змінні резистори R_1 і R_2 забезпечують контроль теплових втрат, що вносяться до LC-контур при розміщенні контрольованого зразка в робочому зазорі давача.

Якщо перемикач SV знаходиться в положенні 1, то вимірюється асиметрична електропровідність σ_a , а підмагнічуюче поле впливає на параметри і зразка, і феритового кільця з індуктивністю L_3 . Коли перемикач SV знаходиться в положенні 2, вимірюється симетрична електропровідність σ_s (підмагнічуюче поле в робочому зазорі відсутнє, в цьому випадку змінюються параметри феритового кільця з індуктивністю L_4 , через яку протікає відповідний струм підмагнічування). Оскільки феритові кільця з індуктивностями L_3 і L_4 ідентичні, а струми через них в обох випадках однакові, зміна параметрів феритових кілець за будь-якого положення перемикача SV не впливає на величину індуктивності L_1 , а відповідно, і на резонансну частоту LC-контур.

Повна блок-схему модернізованого пристрою наведено на рис. 2.

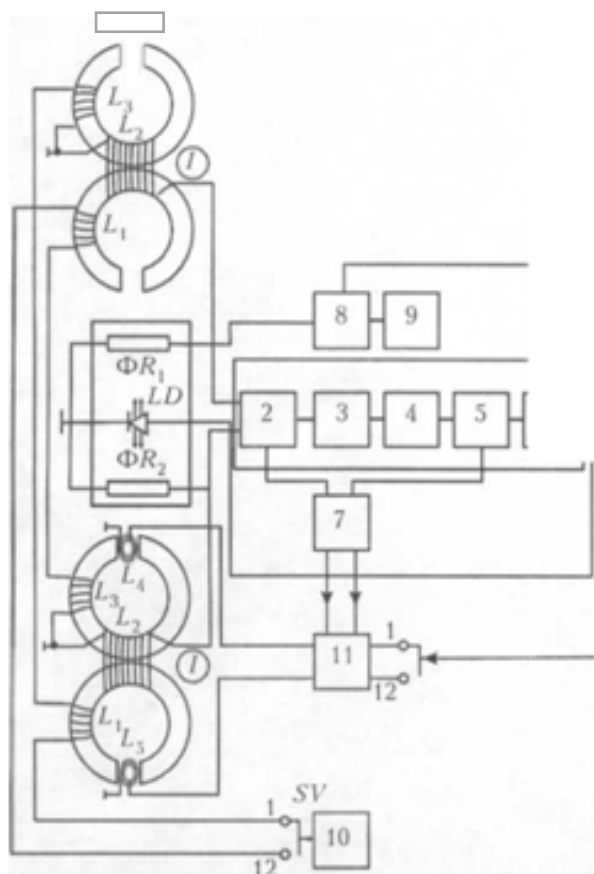


Рис. 2. Структурна схема пристрою для безконтактного вимірювання симетричною σ_s та асиметричною σ_a електропровідності термоелектричних матеріалів:

1, 12 - положення перемикача SV; 2 - електронний комутатор; 3 - автогенератор; 4- підсилювач змінного струму; 5 - синхронний детектор; 6 - підсилювач постійного струму; 7 - генератор імпульсів; 8 - блок обробки сигналу; 9 - індикаторний пристрій; 10 - індикатор сталого струму; 11- вузол корекції; ΦR_1 , ΦR_2 - фоторезистори

У зазорі другого давача з індуктивністю L_2 розміщені мікродавач змінного магнітного поля (у вигляді спеціальних мікроіндуктивностей L'_5 і L''_5). Пристрій містить перемикач SV і генератор постійного струму 10, аналогічний пристрою, представленого на рис. 1, а також вузол порівняння 11, аналогічний використаному в [6, 7]. Вихідний сигнал цього вузла пропорційний зміні чутливості індуктивного датчика при впливі струму підмагнічування, який далі за допомогою блоку 8 використовується для автоматичної корекції показань вихідного приладу. Блок 2 зібраний за схемою амплітудних детекторів, а блок 3 - за схемою суматора.

Реальну роботу створеного пристрою ілюструють наведені на рис.3 часові діаграми напруги на індуктивності Б датчиків, а також індукції магнітного поля в робочому зазорі датчика з індуктивністю Б, за наявності підмагнічування і за його відсутності, що відповідає положенням 1 і 12 перемикача SV, тобто режимам вимірювання асиметричної (σ_a) та симетричної (σ_s) електропровідності.

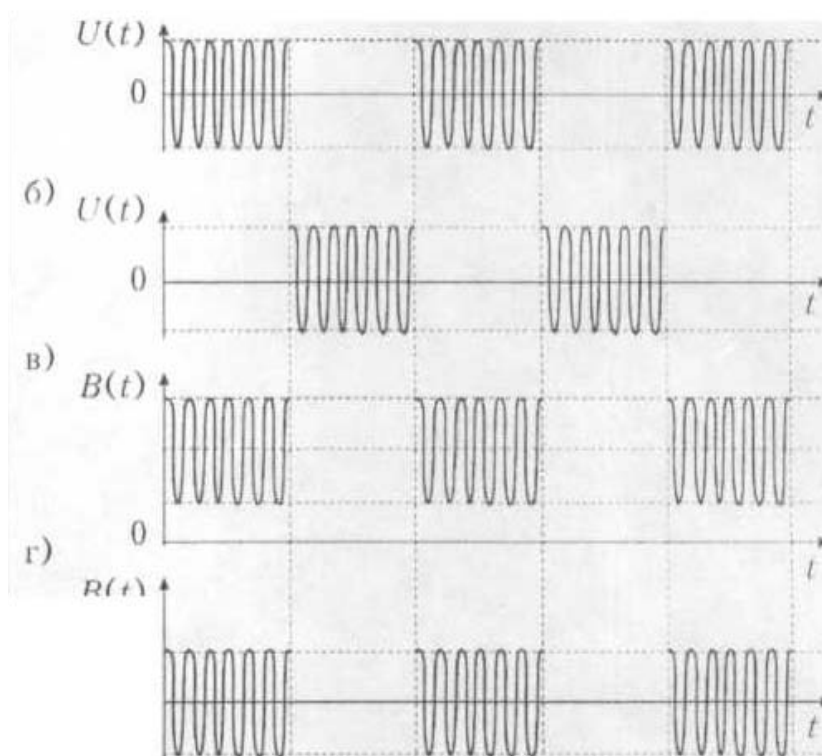


Рис. 3. Тимчасові діаграми напруг (А, б), а також індукції магнітного поля в робочому зорі датчика (А, г) при відсутності підмагнічування (а, б) і при сто наявності (б, г)

При вимірюванні σ_s вихідний сигнал блоку 11 через перемикач SV надходить на блок 8, що вимірює опір фоторезистора ФР1 і коригує його значення відповідно до зміни чутливості вимірювального давача. Його застосування дозволить автоматизувати процеси контролю і розбракування анізотропних зливків, заготовок та деталей.

Висновки

Вимірювання параметрів зразків *CdSb* засвідчили, що реальна похибка вимірювань становить 2%. Пропонований вихрострумний метод може успішно використовуватись для безконтактного вимірювання анізотропії добротності *Z* термоелектричних матеріалів. Його застосування дозволить автоматизувати процеси контролю та розбракування анізотропних зливків, заготовок та деталей.

література

1. Іоффе А.Ф. Напівпровідникові термоелементи. - М. - Л. : Изд. АН СРСР, 1960.
2. Анатичук Л.І. «Термоелементи і термоелектричні пристрої». Справочник.-К. : Наукова думка, 1979. - 768 с.

3. Harman TC, Cahn JH, Logan MJ Measurement of thermal conductivity by utilization of Peltier effect // J. Appl. Phys.- 1959. - Vol. 30, N 9. - P. 1351 - 1359. - DOI: 10.1063 / 1.1735334.
4. Павлов Л.П. Методи вимірювання параметрів напівпровідникових матеріалів. Москва: Вища школа, 1987.
5. Вайнер А.Л. Термоелектричні параметри і їх вимірювання. - Одеса: Негоціант, 1998..
6. Сурін Ю.В., Шимко В.І., Матвєєв В.В. Безконтактний метод вимірювання питомого опору пластин напівпровідників і епітаксійних шарів. / Заводська лабораторія. - 1966. - Т. 32. - №9. - С. 1086-1088.
7. Ащеулов А.А., Бучковський І.А., Романюк І.С. Установка для безконтактного вимірювання електропровідності напівпровідників // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. - 2007. - № 2. - С. 55-57.
8. Ащеулов А.А., Величук Д.Д., Романюк І.С., Черкез Р.Г. Модернізований безконтактний вимірювач параметрів термоелектричних мікромодулів Пельтье // Термоелектрика. - 2008. - №3. - С. 58 - 65.
9. Ащеулов А.А. Безконтактний метод визначення ефективності термоелектричних матеріалів / Технологія та конструювання в електронній апаратурі. - 2009.- №2. - С.43 - 45.
10. Самойлович А.Г. Термоелектричні і термомагнітні методи перетворення енергії. - Чернівці: Рута. - 2006.
11. Пат. 29213 України. Процес визначення добротності и термоелектричних матеріалів. Ащеулов А. А., Бучковський І.А., Величук Д.Д. - 2008. Бюл. №1.

Надійшла до редакції

Ащеулов А.А. докт. техн. наук, професор¹,

Романюк І.С. канд. техн. наук²

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatysh@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина

УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ЭКСПРЕСС- КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Метод основан на определении потерь электрической мощности при протекании вихревых токов Фуко термоэлектрического образца, размещенного в поле действия сердечника катушки индуктивности, через которой последовательно протекают симметричный и асимметричный по характеру электрические токи. Определены выражения для коэффициентов электропроводности σ , термо-ЭДС α , теплопроводности κ и эффективности Z . Предложенный метод позволяет автоматизировать процессы контроля и разбраковки термоэлектрических слитков, заготовок и деталей. Библ. 11, рис 2.

Ключевые слова: вихревой ток Фуко, анизотропные термоэлектрические материалы термоэлектрическая эффективность, симметричная и асимметричная составляющие тензора электропроводности

Anatychuk L.I., acad. National Academy of Sciences of Ukraine^{1,2}

Prybyla A.V., cand. Phys.- math. Sciences^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,

2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

THERMOELECTRIC GENERATORS WITH VARIABLE POWER FLAME HEAT SOURCES, SINGLE-STAGE THERMOPILES AND ELECTRIC ENERGY BATTERIES

In this paper, calculations of the dynamic power of a thermoelectric generator with variable power flame heat sources are made. The results of calculations of such a generator made of thermoelectric material based on PbTe – TAGS are presented. Bibl. 5, Fig. 3.

Key words: thermoelectric generator, computer design, physical model.

References

1. Anatychuk L.I., Mocherniuk R.M., Havryliuk M.V., Andrusiak I.S. (2017). Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces. *J. Thermoelectricity*, 2, 84 – 95.
2. Vikhor L.M., Maksymuk M.V. (2017). Design of thermoelectric cascade modules for solid fuel TEG. *J. Thermoelectricity*, 4, 40– 48.

3. Anatyshuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V., Maksymuk M.V. (2018). Thermoelectric generators with flame heat sources of variable power and temperature stabilizers for thermopiles. *J. Thermoelectricity*, 2.
4. Mykhailovsky V.Ya., Bilinskyi-Slotylo V.R. (2012). Thermoelectric cascade modules of materials based on Bi₂Te₃-PbTe-TAGS. *J. Thermoelectricity*, 4, 67-74.
5. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010). COMSOLAB, 804p.

Submitted 11.12.2018

УДК 53.082

Кобилянський Р.Р. канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

Маник О.М. канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

Вигонний В.Ю.¹

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

ПРО ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ КРІОДЕСТРУКЦІЇ У ДЕРМАТОЛОГІЇ

У роботі наведено аналіз сучасного стану використання кріодеструкції у дерматології, механізм та температурні режими кріодеструкції. Визначено недоліки приладів на основі рідкого азоту та перспективи застосування термоелектричного охолодження для кріодеструкції у дерматології. Бібл. 37.

Ключові слова: кріодеструкція, дерматологія, термоелектричне охолодження.

Вступ

Загальновідомим в медичній практиці є та обставина, що температурний вплив є важливим фактором лікування багатьох захворювань організму людини [1, 2]. В останні роки спостерігається тенденція застосування немедикаментозних методів лікування захворювань шкіри. Одним із напрямків немедикаментозного лікування є кріотерапія, механізм дії якої полягає в стимульованому впливі на нервові закінчення шкіри, внаслідок чого покращуються обмінні й репаративні процеси та прискорюється регрес запальних процесів у випадках хронічних дерматозів. Холод активізує обмін речовин, сприяє уповільненню процесу старіння шкіри, очищає і полегшує її дихання, прискорює кровообіг, допомагає видалити з поверхневих шарів шкіри продукти життєдіяльності організму, підтримує тонус м'язів тощо. Терапевтична дія холоду знижує температуру шкіри, надає протизапальну, протисвербіжну та анальгезуючу дію.

Одним з перспективних напрямів є кріодеструкція – метод видалення різних утворень шкіри шляхом глибокого виморожування біологічних тканин. Для здійснення кріодеструкції необхідно охолодити певну ділянку тіла людини до температури – 50 °С. На сьогодні таке охолодження реалізується за допомогою спеціальних кріоінструментів із використанням азоту [1, 3 – 7]. Проте використання азоту має низку недоліків: азот не дає можливість забезпечити охолодження з необхідною точністю підтримання температури, також існують ризики переохолодження з негативними наслідками. Крім того, рідкий азот є досить небезпечною речовиною і вимагає належної обережності під час використання, а доставка рідкого азоту не

завжди доступна, що зужує можливості використання такого методу. Це відкриває перспективи використання термоелектричного охолодження для кріодеструкції, яким може бути реалізоване охолодження до температури $(0 \div -80)$ °С. Термоелектричні прилади медичного призначення дають можливість точно задавати необхідну температуру робочого інструмента, час температурного впливу на відповідну ділянку людського організму та забезпечувати циклічну зміну режимів охолодження і нагріву [2].

Тому *мета роботи* – аналіз сучасного стану використання кріодеструкції та визначення перспектив застосування термоелектричного охолодження у дерматології.

Використання кріодеструкції у дерматології

Кріодеструкцію називають найприроднішим і фізіологічним способом отримання некрозу [19]. При кріодеструкції в процесі операції патогенна тканина не видаляється, проте зруйнована кріотермічним впливом тканина ще тривалий час залишається на своєму місці. У зруйнованій патологічній тканині поступово формується кріонекроз, який частково розсмоктується та оновлюється здоровими тканинами, а на поверхні тіла людини – відторгується.

У медичній практиці для кріодеструкції як холодоагент найчастіше використовується рідкий азот, який являє собою рідину без кольору, запаху, температура кипіння якої в умовах атмосферного тиску складає -195 °С [5, 6].

Кріодеструкція у дерматології успішно використовується у таких сферах як: видалення бородавок, шкірних утворень, фібром, кератозів, гемангіом, кондилом, колоїдів, базаліом, саркоми, сонячного і старечого лентіго, родимих плям; деструкція небажаних утворень, включаючи вірусні бородавки, дермафіброму, кандилому, контагіозні моллюски, актинічний та себорейний кератози; лікування себореї і вугрів, екземи, дерматитів, атопічних нейродермітів, вугрової висипки, а також лікування інших дефектів шкіри.

Механізм кріодеструкції

Проблему впливу холоду на біологічну тканину слід розглядати в двох різних діапазонах температур: вищої від температури замерзання тканинної рідини та нижчої від цієї температури [8-13]. У першому випадку мова йде про фізіологічну реакцію біологічної тканини на зниження температури навколишнього середовища, а в другому – про пошкодження клітинних структур внаслідок розширення тканинної рідини за її замерзання (утворення кристалів льоду). У різних типах клітин зі зниженням температури різко (у кілька десятків разів) прискорюється синтез так званих білків холодового шоку, які забезпечують адаптацію клітин до нових температурних умов. У процесі цієї адаптації багато клітинних процесів, які практично зупиняються за холодового шоку, поновлюються, і клітина починає нормально функціонувати в нових умовах.

Нижче точки замерзання починається процес заморожування міжклітинної рідини, потім відбувається внутрішньоклітинне обмерзання, внаслідок чого утворюються кристали льоду, які рухаються навколо центрів кристалізації. Кріонекроз (руйнування біологічної тканини) виникає

поступово, при цьому кристалами льоду пошкоджуються (субмікроскопічно «ріжуться») клітини та внутрішньоклітинні мембрани. Кровообіг, надходження кисню, поживних речовин, тканинне дихання і всі біохімічні процеси під час заморожування повністю зупиняються. У результаті настає загибель клітин, у яких були довгостроково паралізовані всі процеси життєдіяльності. У момент утворення в тканинах кристалів льоду відбувається різке збільшення осмотичного тиску в клітинах, оскільки позаклітинна рідина замерзає швидше і катіони солей спрямовуються через мембрани всередину клітин. Такий осмотичний шок біологічні клітини пережити не в змозі.

Кріодеструкція широко використовується для деструкції патогенних тканин – пухлин. У перші години після проведення кріохірургічної операції виникає безпосередній набряк пухлини та оточуючої тканини. Набряк відіграє важливу роль у забезпеченні гемостатичних характеристик кріодеструкції. При цьому оточуюча тканина стискається набряком, у результаті чого обмежується кровообіг зруйнованої ділянки тканини. Таким чином, пухлина відгороджується, припиняється обмін речовин і підвищується внутрішньоклітинний тиск. Це пояснює, чому кріодеструкція є десемінуючим методом руйнування злоякісних пухлин [13–18].

Температурні режими кріодеструкції

Зниження температури на границі патологічної та здорової тканини необхідно здійснювати в межах, мінімально необхідних для кріогенного руйнування всього патологічного вогнища [5, 19]. Значення температури для кріогенного руйнування різних видів тканин коливаються в межах:

- 0 °С – головний мозок;
- –20 ÷ –30 °С – шкіра;
- –50 °С – біологічна тканина.

Зниження температури біологічної тканини до (–5 ÷ –10) °С призводить до початку процесу кристалоутворення у позаклітинному просторі, а зі зниженням температури до (–15 ÷ –20) °С і нижче починається утворення кристалів льоду всередині клітин, що призводить до загибелі біологічної тканини. Важливо відмітити, що маса утвореного льоду займає обсяг на 10 % більший, ніж обсяг рідини, з якої утворюються кристали льоду. [18, 19, 21]. Максимально пошкоджуючий ефект досягається з охолодженням біологічної тканини до –50 °С, а подальше зниження температури не збільшує летальності клітин [5, 6, 18 – 28].

Інтенсивність деструкції клітин у вогнищі заморожування залежить не тільки від мінімальної температури у вогнищі, але й від швидкості охолодження біологічної тканини. Оптимальним є відносно швидке заморожування – (40-50) °С/хв. Ефективність кріодеструкції клітини висока, якщо вона не встигає витіснити через мембрани внутрішньоклітинну рідину в процесі охолодження тканини перед заморожуванням [18, 19, 22].

Більш повільне заморожування (3-5°С/хв) недоцільне, оскільки при цьому не відбуваються процеси внутрішньоклітинного льодоутворення. Також не раціонально використовувати і надшвидке заморожування (більше 100 °С/хв), оскільки при цьому утворюється аморфний лід,

що не пошкоджує структуру біологічної тканини [18].

Надійність кріодеструкції значною мірою залежить не тільки від швидкості охолодження, але й від швидкості подальшого зігрівання, оскільки шкідлива дія низьких температур виникає як в процесі перетворення клітин у кристали льоду, так і під час їх відтавання до нормальної температури. Деструкція клітин під час відтавання відбувається не менш інтенсивно, ніж під час заморожування, оскільки в процесі відтавання виникає перекристалізація льоду, що посилює деструктивний вплив на живі клітини. За повільного зігрівання інтрацелюлярні кристали льоду ще деякий час продовжують рости і ушкоджувати внутрішньоклітинні утворення. Відтавання зі швидкістю (10-12) С/хв забезпечує найбільш надійну деструкцію клітин [18 – 22].

Багаторазове заморожування-відтавання робить можливим знизити летальну для патологічної тканини температуру, знайти своєрідний компроміс між прагненням якомога сильніше заморозити пухлинний осередок і необхідністю зберегти здорові навколишні тканини [18 – 28].

Перспективи використання термоелектричного охолодження

Дослідження [5 – 7, 18 – 28] підтвердили, що для досягнення необхідного лікувального ефекту за дії низьких температур не є обов'язковим використання дуже низьких температур до рівня (-190) °С, що властиві рідкому азоту. Можуть бути використані значно помірніші температури орієнтовано (0 ÷ -50) °С, а це відкриває перспективи використання термоелектричного охолодження, яким може бути реалізоване охолодження до температури (0 ÷ -80) °С.

Слід зазначити, що деструкція відбувається не лише за охолодження, але й за нагріву охолодженої тканини, що зручно реалізувати термоелектричними охолоджуючими пристроями шляхом зміни напрямку струму через них. Це створює потенційну перевагу термоелектричних приладів перед азотними. Ефективність деструкції суттєво зростає за виконання циклічного охолодження-нагріву, що також легко реалізується термоелектричними приладами.

Термоелектричне охолодження є ефективним засобом для створення різноманітних термоелектричних приладів медичного призначення, зокрема для дерматології [29 – 35]. Конструктивна пластичність, надійність, простота в керуванні та можливість точного регулювання температури створюють сприйнятливі умови для широкого практичного застосування таких приладів у медичній практиці. Перспективи застосування термоелектричного охолодження у дерматології обумовлені цілим рядом переваг [29-35]:

- можливість створення мініатюрних охолоджуючих пристроїв з практично необмеженим ресурсом роботи;
- можливість регулювання температури шляхом зміни струму живлення через термоелектричний модель Пельтьє;
- можливість візуалізації, підтримання на заданому рівні та контролю температури робочого інструменту під час терапевтичного впливу;

- можливість циклічної зміни температури робочого інструменту ($-80 \div +50$) °С за наперед заданим законом для уникнення його примерзання до шкіри, що підвищує ефективність лікувального процесу;
- можливість використання при полінозі (алергічна реакція на холод), адже термоелектричним методом можна плавно змінювати температуру терапевтичного впливу.

Таким чином, використання термоелектричного охолодження у дерматології є перспективним для лікування гнійно-запальних процесів та різноманітних захворювань шкіри, а також для видалення злоякісних та доброякісних новоутворень шкіри [36, 37].

Висновки

1. Термоелектричне охолодження має ряд переваг перед традиційними методами кріотерапії, а саме: можливість створення контрольованих температурних режимів теплового впливу на шкіру людини; можливість регулювання та циклічної зміни температури робочого інструменту шляхом зміни струму живлення через термоелектричний модель Пельтьє; можливість візуалізації, підтримання на заданому рівні та контролю температури робочого інструменту під час терапевтичного впливу.
2. З практики використання кріодеструкції встановлено, що оптимальними для деструкції біологічної тканини є температура -50°C . При цьому швидкість охолодження має знаходитись в інтервалі $-(40 - 50)$ °С/хв. Ефективність деструкції зростає за циклічного охолодження і нагріву. Для реалізації оптимальних умов кріодеструкції використання термоелектричного охолодження має низку переваг над азотним. Наявні термоелектричні прилади для кріодеструкції підтверджують їх ефективне використання у медицині.
3. Встановлено, що термоелектричне охолодження є перспективним у дерматології для лікування багатьох різноманітних захворювань шкіри (рожевих вугрів (розацеа), вугрів звичайних (акне), псоріазу, нейродерміту, прурити, варикозних форм червоного плоского лишая тощо), проведення кріомасажу, стимуляції обміну речовин, розгладження зморшок та усунення косметологічних дефектів шкіри шляхом кріодеструкції.

Література:

1. Коленко Е.А. Термоэлектрические охлаждающие приборы. / Е.А. Коленко // Изд. 2-е. - Л.: Наука, 1967. - 283 с.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: / Л.И. Анатычук // Справочник. -К.: Наук. думка. - 1979. - 768 с.
3. Денков В. На грани жизни / В. Денков // Пер. с болг. И. М. Сабуровой. - М.: «Знание», 1988. - 192 с.
4. Maruyama S., Nakagawa K., Takeda H. The flexible cryoprobe using Peltier effect for heat transfer control, Journal of Biomechanical science and engineering, 2008.- P. 138-150.
5. Коченов В.И. Криохирургическая профилактическая онкология. / В.И. Коченов // Н. Новгород. –

2000. – 56 с.
6. Криволинейная профилактическая онкология: краткое учебное и методическое пособие для врачей и студентов / В.И. Коченов; Изд. Организация Нижегородская областная онкологическая ассоциация инвалидов. – 2-е изд., перераб. – Н. Новгород: Б.и., 2003. – 92 с.
 7. Коченов В.И. Адгезивный эффект в криохирургии. / В.И. Коченов // Реферат в МРЖ. -р. IV. - 1982.-№8.
 8. Васильев С.А. Применение криохирургического метода в нейрохирургии / С.А. Васильев, С.Б. Песня-Прасолов // Нейрохирургия, № 4 – 2009. – С.63-70.
 9. Зинкин А.Н. Зингилевская Н.Г., Мусельян Б.Б.. Криовоздействие в оториноларингологии (методические рекомендации). / А.Н. Зинкин, Н.Г. Зингилевская, Б.Б. Мусельян // Краснодар 1997. – С.16.
 10. Механизм разрушения биологических тканей при локальной криодеструкции. / В.В. Шафранов, Е.Н. Борхунова, М.А. Костылев, [и др.] // Вестник российской академии естественных наук .- 2012/1. С.68-77.
 11. Основы криохирургии печени и поджелудочной железы / Б.И. Альперович, Т.Б. Комкова, Н.В. Мерзликин [и др.]: Под. ред. Б.И. Альперовича .– Томск: Печатная мануфактура, 2006.-232с.
 12. Криохирургические методы лечения неоперабельных опухолей органов брюшной полости. / Шалимов С.А. [и др.] // Здоровье Украины: газета.- 2003. – № 74.
 13. Кандель Э.И. Криохирургия. / Э.И. Кандель // 1974М: Медицина. – 304 с.
 14. KC Xu, Nikolai Korpar, LZ Niu. Modern Cryosurgery for Cancer. World Scientific Publisher, 2012.
 15. Budrik V.V. Physical fundamentals of cryomethods in medicine. // Training Manual – edit. by F.Lugnani MD ; trans. from Rus. edited by L.N. Semenova. – 2010, - 140 p.
 16. Cooper S.M. The history of cryosurgery. // J R Soc Med.- 2001.-Vol.94, P.196-201.
 17. Whittaker D.K. Mechanisms of tissue destruction following cryosurgery.// Annals of the Royal College of Surgeons of England.-1984.-vol. 66, P.313-318.
 18. W Yiu, MT Basco, JE Aruny, BE Sumpio. Cryosurgery:A review. Int J Angiol 2007;16(1):1- 6.
 19. Исмаилов Т.А. Применение полупроводниковых термоэлектрических модулей для локального воздействия на отдельные участки человеческого организма / Т.А. Исмаилов // Межвузовский сб. статей, ДГМИ, Махачкала, 1991. С. 8-12.
 20. Криогенный метод лечения опухолей головы и шеи / А.И. Пачес, В.В. Шенталь, Т.П. Птуха [и др.] М., 1978. – С. 168.
 21. О наиболее рациональных методиках криодеструкции злокачественных новообразований В.Ю. Шахов, В.И. Коченов [и др.] // Вопросы онкологии. 1983. - № 9. - С. 31-37.
 22. Коченов В.И. Простейшие криоинструменты для амбулаторной практики врача-криолога. / В.И. Коченов, Ю.В. Королев // Медицинская криология. Выпуск 4. - Нижний Новгород, 2003 – С. 157-160.
 23. Криохирургия в оториноларингологии / Потапов И.И. [и др.] М., 1975 – С.168
 24. Драгомирецкий В.Д. Криохирургические методы лечения заболеваний уха, горла и носа. /

- В.Д. Драгомирецький // Практическая криомедицина. Под ред. В.И. Грищенко и Б.П. Сандомирского. - Киев: Здоровья, 1987. – С. 91-118.
25. Применение регенеративных эффектов криовоздействия в хирургии и при пластике барабанной перепонки. / Н.И. Николаев, В.И. Коченов, С.Н. Цыбусов [и др.] // Медицинская криология. Выпуск 4. Нижний Новгород, 2003. - С. 176-188.
26. Альперович Б.И. Криохирurgia печени и поджелудочной железы / Б.И. Альперович, Л.М. Парамонова, Н.В. Мерзликин // Томск, 1985. – С.125
27. Криогенная техника в гинекологической практике. / Б.И. Веркин, В.И. Грищенко, Б.Н. Муринец-Маркевич [и др.] // Медицинская техника.- 1978.- № 2.– С.28-32.
28. Грищенко В.И. Гипотермия и криохирurgia в акушерстве и гинекологии / В.И. Грищенко // М.: Медицина, 1974. С.280
29. Анатичук Л.І. Термоелектричний прилад для лікування шкіри. // Л.І. Анатичук, Р.Р. Кобилянський, Ю.М. Мочернюк // Термоелектрика. – 2009. – № 4. – С. 90-96.
30. Про використання термоелектричного охолодження у практиці кріодеструкції / І.А. Москалик, О.М. Маник // Термоелектрика. – № 6. – 2013. – С. 84-92.
31. Про використання термоелектричного охолодження в дерматології та косметології / Л.І. Анатичук, О.І. Денисенко, Р.Р. Кобилянський, Т.Я. Каденюк // Термоелектрика. – № 3. – 2015. – С. 57-71.
32. Кобилянський Р.Р. Про перспективи використання термоелектрики для лікування захворювань шкіри холодом / Р.Р. Кобилянський, Т.Я. Каденюк // Науковий вісник Чернівецького університету: зб. наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 5, Вип. 1. – Чернівці : Чернівецький національний університет, 2016. – С. 67-72.
33. Анатичук Л.І., Денисенко О.І., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я., Перепічка М.П. Сучасні методи кріотерапії в дерматологічній практиці // Клінічна та експериментальна патологія. – Том XVI. – №1 (59). – 2017. – С. 150-156.
34. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Комп'ютерне моделювання та оптимізація динамічних режимів роботи термоелектричного приладу для лікування захворювань шкіри // Термоелектрика. – № 2. – 2017. – С. 44-57.
35. L. Anatyshuk, L. Vikhor, M. Kotsur, R. Kobylanskyi, T. Kadaniuk. Optimal Control of Time Dependence of Temperature in Thermoelectric Devices for Medical Purposes // International Journal of Thermophysics". – International Journal of Thermophysics (2018) 39:108. **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.**
36. Анатичук Л.І., Денисенко О.І., Шуленіна О.В., Микитюк О.П., Кобилянський Р.Р. Результати клінічного застосування термоелектричного приладу для лікування захворювань шкіри // Термоелектрика. – № 3. – 2018. – С.52-66.
37. Кобилянський Р.Р., Безпальчук О.О., Вигонний В.Ю. Про застосування термоелектричного охолодження у косметології // Фізика і хімія твердого тіла. – Т.19. – № 4. – 2018. – С.340-344 (DOI: 10.15330/pcss.19.4.340-344).

Надійшла до редакції 18.12.2018

Кобилянський Р.Р. канд. физ.-мат. наук^{1,2}

Маник О.М. канд. физ.-мат. наук^{1,2}

Вигонний В.Ю.¹

¹Институт термоэлектричества, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина *e-mail: anatysh@gmail.com*;

²Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского 2, Черновцы, 58012, Украина

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ КРИОДЕСТРУКЦИИ В ДЕРМАТОЛОГИИ

В работе приведен анализ современного состояния использования кріодеструкції в дерматологии, механизм и температурные режимы кріодеструкції. Определены недостатки приборов на основе жидкого азота и перспективы применения термоэлектрического охлаждения для кріодеструкції в дерматологии. Библиография: 37.

Ключевые слова: кріодеструкція, дерматология, термоэлектрическое охлаждение.

R.R. Kobylanskyi candidate phys.-math. sciences^{1,2},

Manyk O.M. candidate phys.-math. sciences^{1,2}, **V.Yu. Vyhonnyi**²

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

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine,

ON THE USE OF THERMOELECTRIC COOLING FOR CRYODESTRUCTION IN DERMATOLOGY

The paper provides an analysis of the current state of application of cryodestruction in dermatology, the mechanism and temperature modes of cryodestruction. The disadvantages of devices based on liquid nitrogen and the prospects for the use of thermoelectric cooling for cryodestruction in dermatology are determined. Bibliography: 37.

Key words: cryodestruction, dermatology, thermoelectric cooling.

References

1. E.A. Kolenko, Thermoelectric Cooling Devices, / E.A. Kolenko // 2nd ed. - L.: Nauka, 1967, 283 p.
2. L.I. Anatyshuk, Thermoelements and Thermoelectric Devices: / L.I. Anatyshuk // Handbook- - Kyiv: Naukova Dumka, 1979, 768 p.
3. V. Denkov, On the Edge of Life, / V. Denkov // Transl. from Bulgarian by I.M. Saburova - M Znaniye, 1988), 192 p.
4. Maruyama S., Nakagawa K., Takeda H. The flexible cryoprobe using Peltier effect for heat transfer control, Journal of Biomechanical science and engineering, 2008.- P. 138-150.
5. V.I. Kochenov, Cryosurgical Preventive Oncology / V.I. Kochenov // Nizhniy Novgorod, 2000 - 56 p.
6. V.I. Kochenov, Cryological Preventive Oncology: Concise Study Guide for Doctors and Students / V.I. Kochenov // 2nd revised ed. - Nizhniy Novgorod, 2003, 92p.
7. V.I. Kochenov, Adhesive Effect in Cryosurgery, International Abstract Journal **8**, IV (1982).
8. S.A. Vasilyev, S.B. Pesnya-Prasolov, Use of Cryosurgical Method in Neurosurgery// Neurosurgery No. 4, 63 – 70 (2009).
9. A.N. Zinkin, N.G. Zingilevskaya, and B.B. Muselyan, Cryotherapy in Otholaryngology (Guidelines) / A.N. Zinkin, N.G. Zingilevskaya, and B.B. Muselyan // Krasnodar, 1997, p. 16.
10. Mechanism of Destruction of Biological Tissues at Local Cryodestruction/ V.V. Shafranov, E.N. Borkhunova, M.A. Kostylev et al.//, Herald of the Russian Academy of Natural Sciences 2012/1, pp. 68 – 77.
11. Fundamentals of Liver and Pancreatic Gland Cryosurgery/ B.I. Kalperovich, T.B. Komkova, N.V. Merzlikin, et al. Edited by B.I. Alperovich - Tomsk: Pechatnaya Manufactura Publ., 2006 - 232 p.
12. Cryosurgical Methods for Treatment of Inoperable Tumors of Abdominal Cavity/ S.A. Shalimov, et al. // Zdorovye Ukrainy (newspaper). – 2003 – No. 74.
13. E.I. Kandel, Cryosurgery / E.I. Kandel // Medicine, 1974M: - 304 p.
14. KC Xu, Nikolai Korpar, LZ Niu. Modern Cryosurgery for Cancer. World Scientific Publisher, 2012.
15. V.V. Budrik. Physical fundamentals of cryomethods in medicine. // Training Manual – edit. by F.Lugnani MD ; trans. from Rus. edited by L.N. Semenova. – 2010, - 140 p.
16. Cooper S.M. The history of cryosurgery. // J R Soc Med.- 2001.-Vol.94, P.196-201.
17. Whittaker D.K. Mechanisms of tissue destruction following cryosurgery. // Annals of the Royal College of Surgeons of England. -1984.-vol. 66, P.313-318.
18. W Yiu, MT Basco, JE Aruny, BE Sumpio. Cryosurgery: A review. Int J Angiol 2007;16(1):1- 6.
19. T.A. Ismailov, Use of Semiconductor Thermoelectric Modules for Local Effect on Individual Parts of Human Organism. / Interacademic Collection of Articles, Makhachkala: Dagestan State Medical Institute, 1991, p. 8 – 12.
20. Cryogenic Method for Treatment of Head and Neck Tumors/ A.I. Paches, V.V. Shental, P.T. Ptukha, et al. M., 1978. - p. 168.
21. On the Most Rational Methods for Cryodestruction of Malignant Neoplasms V.Yu. Shakhov, V.I. Kochenov et al.// Voprosy Onkologii, 1983- No.9.- p. 31 – 37.
22. V.I. Kochenov. Simplest Cryoinstruments for Clinical Practice of Cryologist /V.I. Kochenov,

- Yu.V. Korolev // Medical Cryology, Issue 4 -Nizhniy Novgorod, 2003, p. 157 – 160.
23. Cryosurgery in Otolaryngology/ I.I. Potapov, et al. M., 1975). – p.168
 24. V.D. Dragomiretskii, Cryosurgical Methods for Treatment of Otolaryngology Diseases/ V.D. Dragomiretskii Practical Cryomedicine, Ed. by V.I. Grischenko and B.P. Sandomirskii (Kyiv: Zdorovye, 1987), p. 91 – 118
 25. Use of Regeneration Effects of Cryotreatment in Surgery and Plastics of Drum Membrane / N.I. Nikolayev, V.I. Kochenov, S.N. Tsybusov, et al., //Medical Cryology, Issue 4. Nizhniy Novgorod, 2003. - p. 176 – 188.
 26. B.I. Alperovich Cryosurgery of Liver and Pancreatic Gland / B.I. Alperovich, L.M. Paramonova, and N.V. Merzlikin //Tomsk, 1985.- p.125
 27. Cryogenic Equipment in Gynecological Practice / B.I. Verkin, V.I. Grischenko, B.N. Murinets-Markevich et al. // Meditsinskaya Tekhnika.- 1978.- No. 2 – p. 28-32.
 28. V.I. Grishchenko. Hypothermia and cryosurgery in obstetrics and gynecology / V.I. Grishchenko // M.: Medicine, 1974. p.280
 29. L.I. Anatyshchuk Thermoelectric device for skin treatment. // L.I. Anatyshchuk, R.R. Kobylanskyi, Yu.M. Mochernyuk // Thermoelectricity. - 2009. - No. 4. - p. 90-96.
 30. On the use of thermoelectric cooling in the practice of cryodestruction / I.A. Moskalyk, A.N. Manyk // Thermoelectricity. - No. 6. - 2013. - S. 84-92.
 31. On the use of thermoelectric cooling in dermatology and cosmetology / L.I. Anatyshchuk, A.I. Denisenko, R.R. Kobylanskyi, T.Ya. Kadenyuk // Thermoelectricity. - No. 3. - 2015. - S. 57-71.
 32. R.R. Kobylanskyi. On the prospects of using thermoelectricity for the cold treatment of skin diseases / R.R. Kobylanskyi, T.Ya. Kadenyuk // Scientific Bulletin of the Chernivtsi University: Collection of. scient. works. Physics. Electronics. - T. 5, no. 1. - Chernivtsi: Chernivtsi National University, 2016. - p. 67-72.
 33. L.I. Anatyshchuk, A.I. Denisenko, R.R. Kobylanskyi, T.Ya. Kadenyuk, M.P. Perepichka Modern methods of cryotherapy in dermatological practice // Clinical and experimental pathology. - Volume XVI. - No. 1 (59). - 2017. - p. 150-156.
 34. L.I. Anatyshchuk, L.M. Vikhor, R.R. Kobylanskyi, T.Ya. Kadenyuk. Computer modeling and optimization of dynamic modes of operation of a thermoelectric device for the treatment of skin diseases // Thermoelectricity. - No. 2. - 2017. - S. 44 57.
 35. L. Anatyshchuk, L. Vikhor, M. Kotsur, R. Kobylanskyi, T. Kadenuk. Optimal Control of Time Dependence of Temperature in Thermoelectric Devices for Medical Purposes // International Journal of Thermophysics. "- International Journal of Thermophysics (2018) 39: 108. <https://doi.org/10.1007/s10765-018-2430-z>.
 36. L.I. Anatyshchuk, A.I. Denisenko, A.V. Shulenina, O.P. Mykytyuk, R.R. Kobylanskyi. The results of the clinical application of a thermoelectric device for the treatment of skin diseases // Thermoelectricity. - No. 3. - 2018. - P.52-66.
 37. R.R. Kobylanskyi, A.A. Bezpalchuk, V.Yu. Vygonyi. On the use of thermoelectric cooling in cosmetology // Physics and Chemistry of a Solid Body. - t.19. - No. 4. - 2018. - S.340-344 (DOI: 10.15330 / pcss.19.4.340-344).

Submitted 18.12.2018

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}, **Максимук М.В.**¹,
Прибила А.В., *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2},
Розвер Ю.Ю.¹, **Романюк І.Ф.**²

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

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ З ПОЛУМ'ЯНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛА ЗМІННОЇ ПОТУЖНОСТІ, ТА ТЕРМОСИФОНАМИ

У роботі виконано розрахунки динамічної потужності термоелектричного генератора з полум'яними джерелами тепла змінної потужності та термосифоном у якості стабілізатора температури. Наводяться результати розрахунків такого генератора, виготовленого із матеріалів на основі ВіТе. Бібл. 6, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: термоелектричний генератор, комп'ютерне проектування, фізична модель, термосифон.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Полум'яні джерела тепла на твердому паливі, зокрема на дровах та пресованих брикетах, широко використовуються для обігріву приміщень і приготування їжі, особливо у сільській місцевості та віддалених районах. Це створює хороші можливості для застосування термоелектричних перетворювачів у якості автономних джерел електричної енергії спільно із такими печами [1 – 3].

Серійне виробництво термоелектричних генераторів із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі здійснюється багатьма виробниками [4, 5]. В них використовуються термоелектричні модулі з матеріалів на основі телуриду вісмуту з граничною «гарячою» температурою 300 °С. Проте температура поверхонь твердопаливних джерел тепла, на які встановлюється ТЕГ, досягає і 600 °С та постійно змінюється у часі. Це призводить до зменшення ресурсу роботи ТЕГ і, як наслідок, до швидкого виходу генератора з ладу. Для усунення цього в конструкції термогенератора передбачається наявність стабілізатора температури гарячої поверхні печі, що відсікає температури, які перевищують 300 °С.

Зрозуміло, що це призводить до зменшення електричної потужності ТЕГ, адже він використовує вже не всю теплову потужність печі.

В даній роботі пропонується використовувати у якості стабілізатора робочої поверхні термоелектричного генератора термосифони [6], що забезпечує оптимальні умови роботи ТЕГ.

Отже, метою даної роботи є розрахунок динамічних робочих характеристик термоелектричного генератора із джерелами тепла змінної потужності що використовує у якості стабілізатора температури термосифон.

Фізична модель

Для розрахунку основних енергетичних характеристик термогенератора на твердому паливі з тепловою стабілізацією температури термобатарей використано фізичну модель ТЕГ [3].

Схематичну конструкцію розробленого ТЕГ з тепловою трубою наведено на рис. 1.

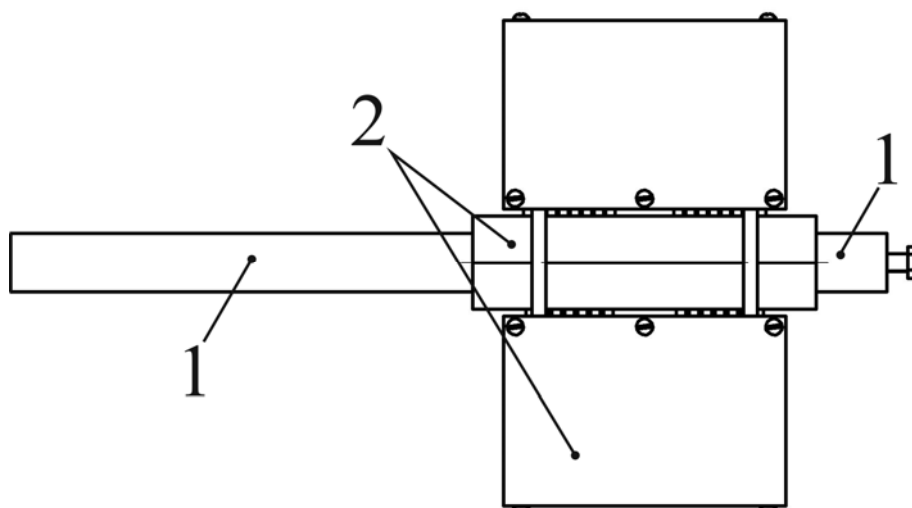


Рис. 1. Схематична конструкція ТЕГ на твердому паливі з тепловою трубою: 1 – термосифон; 2 – термоелектричний перетворювач.

Основними конструктивними елементами термогенератора є термосифон 1 та термоелектричний перетворювач 2, які перебувають у тепловому контакті.

Термоелектричний перетворювач складається з двох симетричних частин, що теплообмінники та термоелектричні генераторні модулі "Алтек-1061" з матеріалу на основі телуриду вісмуту.

Працює термогенератор наступним чином. Теплова енергія від поверхні твердопаливної пічки нагріває випарник термосифона, що спричинює випаровування робочої рідини і рух її парів до зони конденсації, де відбувається теплопередача між парами рідини та термоелектричним перетворювачем. Внаслідок відбору тепла пари рідини

конденсуються і під дією гравітаційних сил повертаються до зони випарника, де процес нагрівання повторюється.

Відібрана від парів рідини теплова енергія проходить через гарячі теплообмінники термоперетворювача ТЕГ, нагріває термоелектричні модулі та відводиться в оточуючий простір повітряними радіаторами. Для інтенсифікації відводу тепла на повітряних радіатор розміщені вентилятори.

Математичний і комп'ютерний описи моделі

Для розрахунку термоелектричного генератора використано рівняння балансу теплот.

На гарячій стороні міститься джерело тепла змінної потужності $Q_1[T_1(t)]$. Його теплова потужність залежить від температури цієї поверхні T_1 , яка, в свою чергу, змінюється із часом t [3], та подається у вигляді деякої функції $f[T_1(t)]$.

$$Q_1 = f[T_1(t)], \quad (1)$$

Підведення тепла від нагрітої поверхні до гарячої сторони термоелектричного модуля та відведення тепла до холодного теплообмінника описується рівняннями:

$$Q_1 = \chi_1[T_1(t) - T_r], \quad (2)$$

$$Q_2 = \chi_2[T_x - T_2], \quad (3)$$

де χ_1, χ_2 – теплові опори гарячого і холодного теплообмінників; T_r, T_x – температури гарячої та холодної сторони термоелектричного модуля відповідно; T_2 – температура зовнішньої поверхні холодного теплообмінника.

Теплова потужність Q_2 відводиться від холодного теплообмінника шляхом примусової конвекції повітря у навколишнє середовище:

$$Q_2 = \alpha(T_2 - T_0)S_m, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт конвективного теплообміну між поверхнею теплообмінника і навколишнім середовищем; S_m – площа поверхні теплообміну; T_0 – температура навколишнього середовища.

Електрична потужність, яка генерується термоелектричним модулем пропорційна $Q_1[T_1(t)]$ та його ККД η :

$$W = Q_1[T_1(t)] \cdot \eta, \quad (5)$$

Основні втрати тепла Q_3 відбуваються через теплову ізоляцію:

$$Q_3 = \chi_4(T_M - T_0), \quad (6)$$

де χ_4 – тепловий опір ізоляції, T_M – температура внутрішньої поверхні теплової ізоляції.

Таким чином, рівняння теплового балансу для обраної моделі термоелектричного генератора можна записати у вигляді:

$$Q_1 = W + Q_2 + Q_3. \quad (7)$$

Для комп'ютерного представлення математичної моделі ТЕГ використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [6]. Для цього необхідно представити наші рівняння у наступному вигляді.

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (8)$$

й електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (9)$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (10)$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \quad (11)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T. \quad (12)$$

Тут \vec{E} – щільність потоку енергії, \vec{q} – щільність теплового потоку, \vec{j} – щільність електричного струму, U – електричний потенціал, T – температура, α , σ , κ – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності.

Враховуючи (10) – (12), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (13)$$

Тоді закони збереження (8), (9) набувають вигляду:

$$-\nabla [(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla [(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (14)$$

$$-\nabla (\sigma \alpha \nabla T) - \nabla (\sigma \nabla U) = 0. \quad (15)$$

З розв'язку рівняння (14) - (15) ми одержимо розподіли фізичних полів, а також інтегральні значення ефективності та потужності ТЕГ.

Опис динамічних потужностей ТЕГ

Таким чином, використовуючи комп'ютерні методи, проведено розрахунок динамічних потужностей ТЕГ за умов його встановлення на поверхні пічки (рис. 2).

Таким чином, на рис. 2 наведено залежність потужності ТЕГ, розміщеного на задній поверхні пічки, від часу для температури холодної сторони ТЕГ $T_x = 30^\circ\text{C}$ (1 на рис. 2). Температура гарячої сторони ТЕГ показана суцільною кривою 2 на рис. 2.

Як видно із рис. 2, електрична потужність ТЕГ із термосифоном практично не залежить від часу і рівна ~ 26 Вт за умови використання 4 термоелектричних модулів АЛТЕК-22.

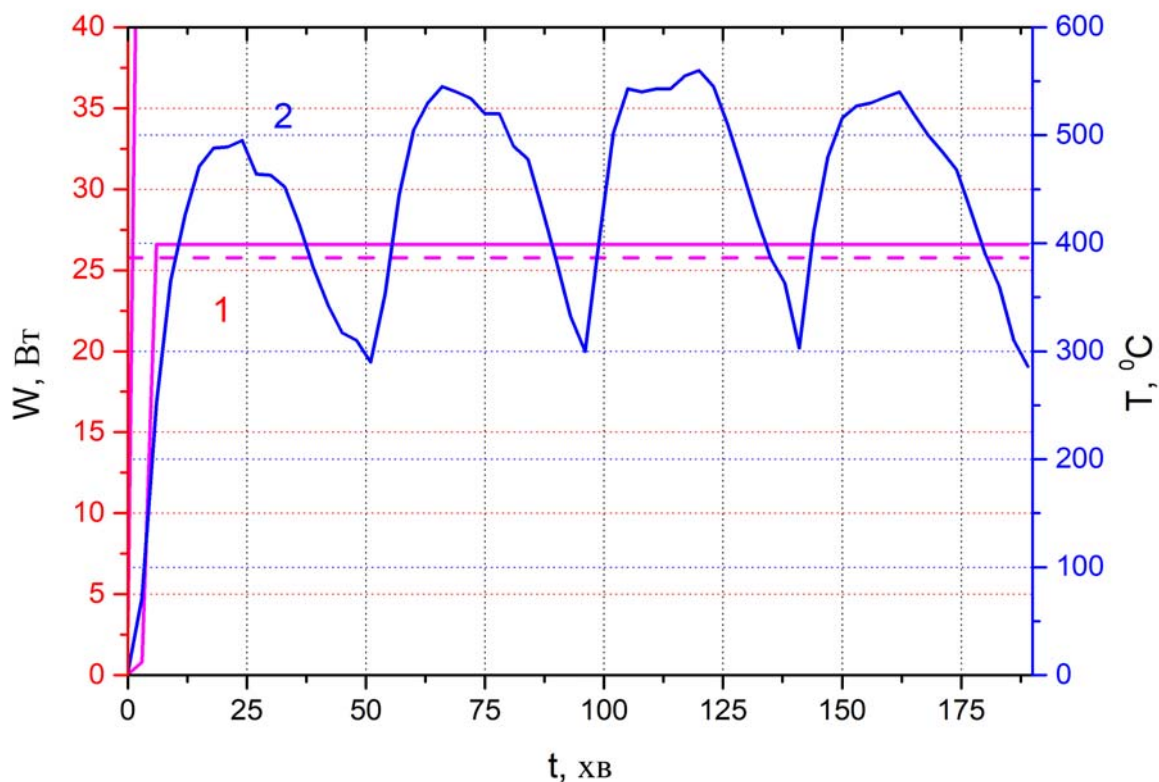


Рис. 2. Залежність потужності ТЕГ розміщеного на задній поверхні пічки від часу: 1 – потужність ТЕГ при $T_x=30^\circ$, 2 – температура поверхні пічки.

Експериментальні дослідження ТЕГ

Зовнішній вигляд розробленого ТЕГ на твердому паливі наведено на рис. 3.

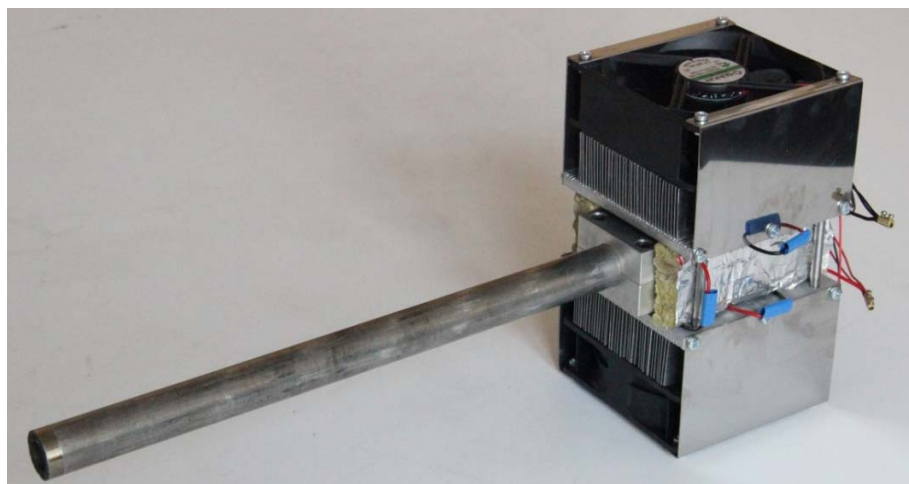


Рис. 3. Зовнішній вигляд ТЕГ із термосифоном

Для дослідження теплових характеристик теплової труби розроблено експериментальний стенд, наведений на рис. 4.

В ході стендових досліджень визначався температурний градієнт між зонами нагріву та конденсації при теплових потоках потужністю 560-200 Вт. Відвід тепла від термосифона здійснювався теплообміном з оточуючим середовищем, кут нахилу до горизонталі регулювався від 4 до 10 градусів.

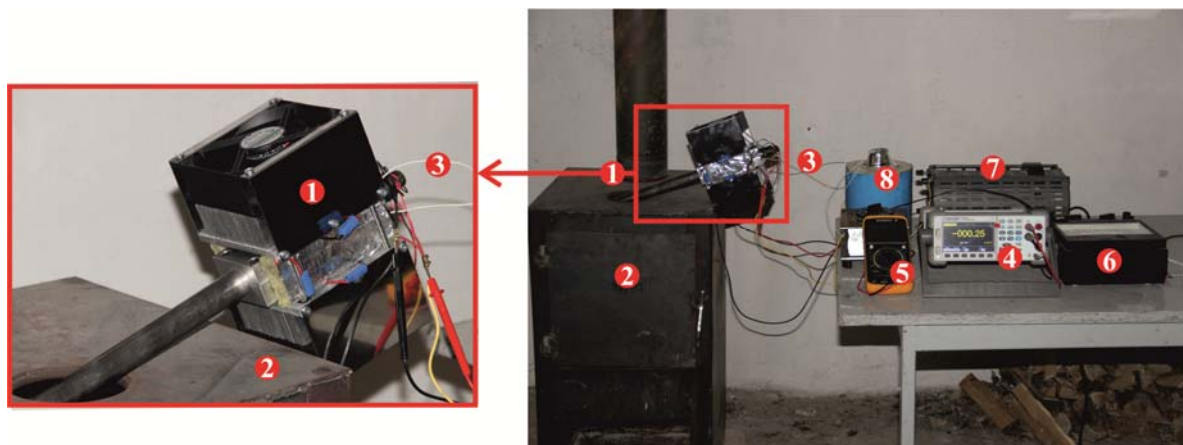


Рис. 4. Експериментальний стенд для дослідження енергетичних характеристик ТЕГ з термосифоном: 1 – твердопаливна пічка; 2 – ТЕГ; 3 – термопары; 4 – мультиметр; 5 – цифровий вольтметр; 6 – амперметр; 7 – реостат; 8 – дюар з льодом.

Для вимірювання та регулювання підведеного теплового потоку використовувався ватметр Д5088 з класом точності 0.2 та лабораторний автотрансформатор ЛАТР. В якості джерела тепла для теплової труби використовувався резистивний нагрівник. Для зменшення контактного опору між поверхнями теплової труби та нагрівника

застосовувалась графітна плівка, а для зниження теплових втрат з поверхні зони нагріву – базальтова теплоізоляція.

Розподіл температур вздовж труби контролювався термопарами типу ТХА. Система вимірювання температур відкалібрована в температурному діапазоні від -10°C до 700°C з абсолютною похибкою $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$.

Таблиця

Енергетичні характеристики ТЕГ на твердому паливі з термосифоном

№	Найменування, одиниці вимірювання	Значення
1	Максимальна електрична потужність, Вт	21
2	Вихідна електрична напруга (без електронного блоку стабілізації), В	6
3	Сила струму, А	3,5
4	Зовнішній опір узгодженого навантаження, Ом	1.75
5	Температура гарячої сторони термобатарей, $^{\circ}\text{C}$	250
6	Температура холодної сторони термобатарей, $^{\circ}\text{C}$	50

Таким чином, експериментальні дослідження ТЕГ із тепловою трубою підтвердили основні результати проектування та створюють хороші передумови для подальшого практичного використання таких генераторів.

Висновки

1. На основі експериментальних даних, розраховано динамічну потужність ТЕГ із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі та термосифоном у якості стабілізатора температури
2. Розраховано електричну потужність для досліджуваного варіанту ТЕГ, що становить ~ 26 Вт за умови використання 4 термоелектричних модулів АЛТЕК-22.
3. В результаті експериментальних досліджень підтверджено, що використання термосифона в конструкції термогенераторів на твердому паливі є ефективним методом стабілізації температури гарячої сторони термоелектричних модулів.
4. Встановлено, що номінальна електрична потужність ТЕГ з термосифоном складає ~ 21 Вт. При цьому використання термосифона в конструкції розробленого ТЕГ дозволяє отримати стабільні значення температури гарячої сторони термобатарей на рівні 250°C .

Література

1. Анатичук Л.І., Мочернюк Р.М., Гаврилюк М.В., Андрусак І.С. Термоелектричний

- генератор, що використовує тепло нагрітих поверхонь // Термоелектрика. – 2017. №2. – С 84 – 95.
2. Анатичук Л.І., Розвер Ю.Ю., Прибила А.В., Максимук М.В. Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності і стабілізаторами температури термобатарей // Термоелектрика. – 2018. – №2. –С. 22-30
 3. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності, однокаскадними термобатареями та акумуляторами електричної енергії // Термоелектрика. – 2018. – №6. – С. 17-26
 4. <http://www.energopetch.ru>
 5. <http://kryothermtec.com/ru>
 6. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%84%D0%BE%D0%BD>.

Надійшла до редакції 25.12.2018

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}

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

¹Інститут термоелектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatysh@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПЛАМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА СМЕННОЙ МОЩНОСТИ, И ТЕРМОСИФОНАМИ

В работе выполнены расчеты динамической мощности термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла сменной мощности и термосифоном в качестве стабилизатора температуры. Приводятся результаты расчетов такого генератора, изготовленного из материалов на основе BiTe. Библ. 6, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, компьютерное проектирование, физическая модель, термосифон.

Anatychuk L.I., *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*^{1,2}
Prybyla A.V., *cand. Phys.- math. Sciences*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;
²Yu.Fedkovich Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

THERMOELECTRIC GENERATORS WITH VARIABLE POWER HEAT SOURCES AND THERMOSIPHONS

In this work, the dynamic power of a thermoelectric generator with variable power flame heat sources and a thermosiphon as a temperature stabilizer is calculated. The results of calculations of such a generator made of BiTe based materials are presented. Bibl. 6, Fig. 4, table. 1.

Key words: thermoelectric generator, computer design, physical model, thermosiphon.

References

1. Anatychuk L.I., Mocherniuk R.M., Andrusiak I.S. (2017). Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces. *J.Thermoelectricity*, 2, P. 84 – 95.
2. Anatychuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V., Maksymuk M.V. (2018). Thermoelectric generators with variable power flame heat sources and temperature stabilizers for thermopiles. *J.Thermoelectricity*, 2, P. 23-30
3. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2018). Thermoelectric genertaors with variable power heat sources, single-stage thermopiles and electric energy batteries. *J.Thermoelectricity*, 6, P. 14-22
4. <http://www.energopech.ru>
5. <http://kryothermtec.com/ru>
6. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%84%D0%BE%D0%BD>.

Submitted 25.12.2018

УДК 536



Кузь Р. В.

Кузь Р. В. канд. фіз.-мат. наук

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

**ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ ДЛЯ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.
АНАЛІЗ ПРАКТИЧНИХ ДОСЯГНЕНЬ**

У роботі наводяться результати аналізу експериментальних робіт, що стосуються використання термоелектричних генераторів у сукупності з двигунами внутрішнього згорання на автотранспорті з метою отримання додаткової електричної енергії і, відповідно, економії палива. Розглянуто розвиток і сучасний стан розробок таких генераторів. Зроблено висновки про можливості і необхідні умови для використання термоелектричних генераторів з двигунами внутрішнього згорання. Бібл. 77.

Ключові слова: термоелектричний генератор, двигун внутрішнього згорання, утилізація тепла.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Застосування термоелектричних генераторів для утилізації тепла автомобільних двигунів з метою отримання електричної енергії на протязі останніх трьох десятиріч залишається предметом підвищеного інтересу з боку автомобільної індустрії та спеціалістів, що займаються термоелектрикою. Про це свідчить велика кількість публікацій, патентів та доповідей на конференціях [1]. Така зацікавленість є зрозумілою, оскільки більше 2/3 теплової енергії, що отримується від спалення палива, віддається в навколишнє середовище.

Як видно, тільки з вихлопними газами втрачається 30-35% теплової енергії. За даними ОПЕК (організація країн-експортерів нафти) у даний час у світі зареєстровано біля 1.2 млрд. одиниць автотранспорту. Його доля у світовому споживанні нафти сягає 65%, або ~65 млн. барелів в день [2]. Тобто, з вихлопними газами автотранспорту щоденно втрачається $\sim 10^{17}$ Дж теплової енергії. Перетворення цієї енергії в електричну з ККД 10% дасть величину, що за порядком збігається з кількістю електроенергії, що наразі виробляється усіма атомними електростанціями світу [3]. Така ситуація зумовлює розробки термоелектричних генераторів для автотранспорту. Утилізацією тепла вихлопних газів реалізуються дві основні цілі. Це економія палива і, відповідно, зменшення викиду в атмосферу вуглекислого газу.

Початком ери термоелектричних генераторів для автотранспорту можна вважати 1961 рік, коли **Інститутом Naval**, США подано патент на термоелектричний генератор, який може працювати від тепла вихлопних газів [4]. Перший термоелектричний генератор, що використовує тепло вихлопних газів, було представлено співробітниками інституту на Конгресі автомобільної інженерії в Детройті в 1963 році [5].

У 1988 році на 7-ій Міжнародній конференції з термоелектрики **Університет Karlsruhe**, Німеччина, представив термоелектричний генератор на основі матеріалів з FeSi_2 [6]. Генератор випробувано на двигуні Porsche 944 потужністю 160 кВт. Охолодження генератора здійснювалося водоциркуляційною системою автомобіля. На максимальній потужності роботи двигуна отримано наступні результати. Теплова потужність вихлопного газу 120 кВт, температура газу – 800 К, різниця температур – 490 К, вихідна електрична потужність генератора – 58 Вт. Спад температури газу на генераторі складав 30 К, з чого зроблено висновок про можливість використання більшої кількості термоелементів, що не дозволяли габарити вихлопної системи.

На початку 90-х років на основі власних модулів у компанії **Hi-Z**, (США) [7-26] було створено і випробувано термогенератор, у якому використано тепло вихлопних газів дизеля NTC-350 потужністю 300 к.с. Він розвивав електричну потужність 1 кВт. Температура вихлопних газів становила 200-400°C.

Пізніше, у 2004 році, компанія Hi-Z сумісно з Delphi Systems розробили й провели випробування генератора на пікапі Sierra з бензиновим двигуном потужністю 270 к.с. Реально було отримано 228 Вт електричної енергії [27].

В 1993 році **Компанія Shiroki**, (Японія) [28] розробила термоелектричний генератор для автомобіля, де були застосовані блоки модулів компанії Global Thermoelectric (Канада). Матеріал модулів – Pb-Te. Генератор мав форму циліндра діаметром 190 мм і висотою 180 мм. Вага генератора 5.8 кг. Генератор було встановлено на бензиновому двигуні об'ємом 2000 см³. На холостому ходу він розвивав електричну потужність 1 Вт, при швидкості 40-60 км/год по рівній дорозі 10-20 Вт, при швидкості 60-65 км/год на підйомі до 130 Вт.

Компанія **Nissan Motor**, (Японія) [29] у 1998 році розробила і випробувала генератор з термоелектричними перетворювачами Ge-Si. Генератор виконано у вигляді плоскої прямокутної камери з внутрішньою оболонкою для проходження газів і ребристими радіаторами для відведення тепла від газів. Знімання тепла проводиться водою, що пропускається через зовнішню оболонку. Генератор випробувано на бензиновому двигуні об'ємом 3 л. При температурі вихлопного газу 592°C і температурі охолоджуючої рідини 35°C генератор розвивав потужність 35.6 Вт. При цьому теплова потужність через генератор складала 4 кВт. У 2001 році компанією запатентовано систему електричного живлення автомобіля, яка містить термоелектричний генератор [30].

У 2000-х роках **компанією Komatsu**, (Японія) [31] створено прототип ТЕГ для дизельного двигуна термосифонного типу. Він містив випаровувач з конденсатором що

утворювали термосифон. Цим досягався інтенсивний перенос тепла від вихлопного газу до модулів. Відвід тепла від модулів здійснювався водою. Випробування генератора проводилося на стенді, який імітував теплові умови в генераторі. Досягнуто 3.35 кВт електричної енергії при ККД модулів 4.3 %.

З використанням таких модулів був створений генератор, установлений на автомобілі з бензиновим двигуном об'ємом 2000 см³. При швидкості 60 км/год генератор розвивав 266 Вт.

Дослідження виконувалося в рамках «Національного проекту по розвитку вдосконалених систем термоелектричного поєднання енергії».

У 2001 році **Університет Monash**, (Австралія) [32 – 33] презентував макетний зразок термоелектричного генератора з модулів Ni-Z. Джерелом тепла були вихлопні гази від дизельного двигуна потужністю 140 кВт. Загальна електрична потужність генератора склала 42.3 Вт. Наводились міркування про перспективність використання термоелектрики для утилізації тепла від двигунів внутрішнього згорання

В Університеті Clarkson, (США) [34 – 39] у 2004 році розроблено термоелектричний генератора для автомобіля потужністю 300 Вт. Для генератора були використані модулі компанії Ni-Z. Генератор випробувано на пікапі General Motors Sierra, що містить V8 двигун потужністю 200 кВт. Найбільше значення вихідної електричної потужності генератора 225.1 Вт досягнуто при швидкості автомобіля 112.65 км/год. Температура гарячого газу 530°C, температура охолоджуючої рідини 86.7°C.

Компанія Gentherm, (США) [40 – 56] з 2004 року по 2011 рік з ініціативи Міністерства енергетики США у рамках програми «Утилізація тепла вихлопних газів» виконувала програму по створенню термоелектричного генератора для легкового автомобіля. Створено генератори, які встановлено на автомобілі **BMW** та Ford Lincoln MKT. В автомобілі BMW X6 при потужності бензинового двигуна 225 кВт генератор розвиває максимальну потужність 450 Вт. При їзді в умовах міста генератор розвиває середню потужність 200 Вт. Генератор для автомобіля **Ford Lincoln MKT** з бензиновим двигуном потужністю 260 кВт при максимальній температурі вихлопних газів розвиває потужність близько 600 Вт.

У 2007 році **Національний інститут вищої індустріальної технології й науки**, (Японія) [57] разом з компанією **Atsumitec** розробили термоелектричний матеріал і модулі на основі Fe-V-Ti-Al. Модулі були використані в генераторі, встановленому на мотоциклі, який розвивав електричну потужність до 12 Вт при швидкості 60 км/год, що було цілком достатньо для підзарядки акумуляторів.

У 2008 році **Університет Арістотеля**, (Греція) [58-59] представив результати досліджень генератора для легкового автомобіля, що складається зі стандартних модулів Melcor 2.5 × 2.5 см². Конструкція генератора містить теплообмінне обладнання для відводу тепла від циліндричної вихлопної труби, термоелектричні модулі й повітряний радіатор. Генератор установлено на автомобілі Toyota Starlet з об'ємом двигуна 1.3 л. Генератор установлювався в різних частинах вихлопної труби. Вивчалася робота генератора при різних швидкостях руху автомобіля.

Отримані значення електричної потужності від 0.5 до 1.5 Вт. Робиться висновок, що

установка серії таких генераторів уздовж вихлопної труби дозволить одержати електричну потужність близько 30 Вт. Проведені найпростіші розрахунки генератора, робляться припущення, що вартість генератора може бути повернута у вигляді економії палива протягом 2 – 3 років при експлуатації автомобіля 10000 км на рік.

Роботи по дослідженню і створенню генератора для автомобіля проводилися в **Університеті Кракова** разом з **Познанським університетом**, (Польща) [60-62]. У 2007 році вивчено можливості відводу тепла від вихлопних газів. Розроблено теплообмінні системи для двигуна 1.3 л, через які відводилося до 25 кВт теплової потужності. Передбачалося, що при створенні генератора з ККД 5% можна одержати до 750 Вт електричної енергії. У 2010 році створено термоелектричний генератор для дизельного двигуна об'ємом 1.3 л. Генератор розвив максимальну потужність 200 Вт. При цьому теплова потужність вихлопних газів складала 35 кВт. Гаряча температура на вході генератора 290°C.

У 2008 році **компанія Volkswagen**, (Німеччина) [63] презентувала на конференції «Thermoelektrik-Eine Chance Fur Die Atomobillindustrie» у Берліні автомобіль Volkswagen Golf Plus з установленим термоелектричним генератором. Компанія Volkswagen заявила, що отримано 600 Вт електричної енергії в умовах руху по автостраді. Ця потужність становить близько 30% від потужності, необхідної для живлення електричних приладів автомобіля.

Компанія BMW, (Німеччина) [64, 65] в жовтні 2008 року представила термоелектричний генератор для використання тепла вихлопних газів автомобіля, розроблений разом з **DLR** (аерокосмічним центром Німеччини). Було досягнуто 200 Вт середньої електричної потужності при потужності бензинового двигуна 225 кВт. Максимальна потужність 800 Вт досягалася при швидкості автомобіля 135 км/год. Генератор успішно працював при пробігу по автостраді більш ніж 12000 км. Відвід тепла від генератора забезпечувався додатковою системою охолодження. Температура в холодному контурі становила 60°C, тепло розсіювалося двома додатковими радіаторами, розміщеними в надколісних дугах. Випробуванню генератора передували ретельні теоретичні розрахунки, вимірювання температур та потоку вихлопного газу в різних місцях вихлопної системи та в різних режимах роботи. Подальші дослідження ТЕГ були зосередженні на досягненні питомої потужності 50 Вт/кг. (Зараз 25 Вт/кг). У 2012 році генератор демонструвався на міжнародній конференції з термоелектрики ICT/ECT-2012.

Університетами Chunguk, та **Yonsei**, (Корея) [66-67] проведено ряд сумісних робіт по створенню термоелектричних генераторів для гібридних автомобілів. У 2011 році представлено термоелектричний генератор для гібридного автомобіля з бензиновим двигуном об'ємом 2 л. Генератор розвивав потужність 75 Вт при швидкості автомобіля 80 км/год. Пропонується використовувати такий генератор замість стандартного автомобільного генератора.

У 2012 році **дослідний центр FIAT**, (Італія) [68] представив прототип термоелектричного генератора для легкої вантажівки з дизельним двигуном об'ємом 2.3 л. Генератор розвивав максимальну електричну потужність 1 кВт при швидкості вантажівки 130 км/год. При цьому температура вихлопного газу на вході генератора складала 450 °C.

Температура охолоджуючої рідини 110-130°C. В генераторі використано 504 модулі на основі *Bi-Te* розмірами 16 × 16 × 6.8 мм.

У 2014 році **Вуханським технологічним університетом**, (Китай) [69-70] представлено термоелектричний генератор для бензинового двигуна об'ємом 3.9 л. В генераторі використано модулі *Bi-Te*. Габарити генератора склали 1420 × 670 × 185 мм. При потужності двигуна 35 кВт генератор розвивав електричну потужність 390 Вт. Зроблено висновки про необхідність оптимізації гарячого теплообмінника.

В розробках, проведених в **Університеті Гонконгу**, (Китай) [71] звертається особлива увага на перетворювачі струму та напруги для термоелектричних генераторів, що використовуються в різних режимах роботи. Розробляються різні схеми та алгоритми роботи таких перетворювачів, в яких використано МРРТ технологію – відслідковування точки максимальної потужності у нестационарному режимі роботи. Робляться висновки про можливість збільшення ефективності генератора на 20% при використанні МРРТ технології. Аналогічні роботи ведуться в **університеті Глазго**, (Великобританія) [72].

У 2015 році **Університет Boise**, США [73] представив термоелектричний генератор максимальною потужністю 1 кВт, що працює від тепла вихлопних газів бензинового двигуна. Термоелектричні модулі генератора виготовлено з наноструктурованих напів-Гейслерових елементів. Гаряча температура на вході генератора складала 600°C. Холодна температура підтримувалася на рівні 100°C. Потік газу – 480 г/с.

За ініціативи компанії **Scania**, (Швеція), в **університеті Лінчепінга**, (Швеція) [74] було проведено дослідження по знаходженню найбільш придатних матеріалів для використання у термоелектричному генераторі для вантажівки Scania. Сумісно з німецькою компанією **EberspÄacher Exhaust Technology** спроектовано ТЕГ та проведено його інтеграцію у вантажівку Scania. Вантажівку з ТЕГ було представлено у 2015 році на Міжнародній термоелектричній конференції ICT/ECT-2015 у Дрездені [75]. За результатами випробувань ТЕГ розвиває максимальну потужність біля 300 Вт. При цьому потік вихлопного газу складав 1000 кг/год при температурі 300°C. Використана теплова потужність – 18 кВт. Потік охолоджуючої речовини – 30 л/хв при температурі 30°C.

У 2015 році компанія **Friedrich Boysen GmbH**, (Німеччина) [76] представила термоелектричний генератор для дизельного двигуна легкового автомобіля. Основний акцент у роботі віддано проектуванню гарячого теплообмінника з метою інтенсифікації теплообміну, зменшенню теплових втрат та зниженню зворотнього тиску у вихлопній системі. Випробувано 2 типи генератора – з модулями на основі *PbTe* та з модулями на основі *Bi-Te*. Генератор розвиває максимальну потужність 80 Вт з модулями на основі *PbTe* при вхідній температурі гарячого газу 700°C і потоці 50 кг/год. Аналогічну потужність розвиває генератор з модулями на основі *Bi-Te* при температурі гарячого газу 600°C і потоці 43,2 кг/год. Температура холодного теплообмінника підтримувалася 47°C і забезпечувалася зовнішньою системою охолодження.

Успіхи у проектуванні та створенні термоелектричних генераторів для автотранспорту приведено у таблиці.

Таблиця 1

Досягнення у створенні термоелектричних генераторів для автотранспорту

Компанія	Потужність (об'єм) двигуна	Тип двигуна	Потужність ТЕГ, Вт	ККД ТЕГ, %*	Питома вартість ТЕГ, \$/Вт**	Літера- тура
Університет Karlsruhe, Німеччина	160 кВт	бензин	58	0,1%	-	3
Hi-Z, США	220 кВт	дизель	1000	1.1%	32	18-19
Hi-Z, США	198 кВт	бензин	228	0.3%	-	18-19
Shiroki, Японія	(2000 см ³)	бензин	130	0.3%	-	24
Nissan Motor, Японія	(3000 см ³)	бензин	35.6	0.1%	-	25-26
Komatsu, Японія	(2000 см ³)	бензин	266	0.4%	-	28
Університет Monash, Австралія	140 кВт	дизель	42.3	0.1%	-	29-30
Університет Clarkson, США	200 кВт	бензин	225	0.3%	70	27
Gentherm, США	225 кВт	бензин	450	0.5%	-	51
Gentherm, США	260 кВт	бензин	600	0.6%	-	52
Atsumites, Японія	-	бензин	12	-	25	72
Університет Аристотеля, Греція	(1300 см ³)	бензин	30	0.1%	65	73-74
Університет Кракова, Польща	(1300 см ³)	дизель	200	0.8%	-	77-79
Volkswagen, Німеччина	90 кВт	бензин	600	<u>1.7%</u>	24	75
BMW, Німеччина	225 кВт	бензин	800	1%	29	109
Університет Chunguk, Корея	(2000 см ³)	бензин	75	0.2%	-	94-95
FIAT, Італія	(2300 см ³)	дизель	1000	<u>1.7%</u>	25	87
Вуханський університет, Китай	(3900 см ³)	бензин	390	1.3%	30	96-97
Університет Voise, США	220 кВт	бензин	1000	1.4%	26	93
Scania, Швеція	220 кВт	дизель	300	0.4%	-	55-56
Friedrich Boysen GmbH, Німеччина	90 кВт	бензин	80	1.6%	23	112

*Оцінки ККД ТЕГ зроблено на основі наведених у посиланнях даних про потужність та тип двигуна, на якому було встановлено генератор, чи на основі вказаних параметрів вихлопного газу.

**Оцінки питомої вартості ТЕГ зроблено на основі наведеної у посиланнях інформації про використані термоелектричні модулі виходячи з того, що вони складають ~40% вартості ТЕГ.

У «Багаторічній програмі розвитку автомобільних технологій» відділу Енергоефективності та відновлювальної енергії Міністерства енергетики США [121] аргументація ціни генератора (1 \$/W) сформульована наступним чином:

«Термоелектричні прилади/системи повинні бути конкурентоспроможними з існуючими на даний час технологіями генерації електроенергії в автомобілі та бути доступними для масового виробництва». Як видно, питома вартість термоелектричних генераторів до сьогодення є значно вищою. Цим і пояснюється відсутність широкого застосування ТЕГ в автомобілях.

Проведений аналіз дав наступні результати. Серед оглянутих робіт 15% складають паненти, що стосуються використання термоелектрики для утилізації тепла двигунів внутрішнього згорання. Решта 75% робіт – доповіді на конференціях та у наукових журналах. Серед них:

- огляди та звіти про досягнення у використанні ТЕГ для ДВЗ;
- експериментальні роботи по розробці ТЕГ, які засновані на використанні комп'ютерного моделювання чи спрощених аналітичних моделях;
- експериментальні роботи емпіричного характеру, які використовують тільки основи проектування звичайних термоелектричних генераторів.

Висновки

1. Створені зразки генераторів підтверджують можливість одержання електрики від тепла вихлопних газів. На даний час досягнуто електричні потужності ~ 1 кВт та ККД ~1.7 %.
2. Серед розроблених генераторів ще немає таких, які могли б бути використані для їхнього промислового випуску. На даний час питома вартість генераторів (10 – 60 \$/W) значно перевищує рекомендовану 1 \$/W, яка необхідна для конкурентної спроможності ТЕГ перед іншими джерелами електрики.
3. Немає досліджень, у яких система «двигун-термогенератор» розглядалася б як єдине ціле. Немає даних про вплив термогенератора на роботу двигуна, особливо коли відвід тепла від генератора здійснюється системою охолодження двигуна.
4. Проектування автомобільних термоелектричних генераторів у всіх розглянутих випадках є емпіричним. Проектування засноване на переборі різних варіантів компонентів моделі з метою знаходження найкращого. Однак, такі підходи не виявляють загальних закономірностей, якими описуються ТЕГ, що знижує можливості знаходження оптимальних конструкцій.

Література

1. Анатичук Л. І., Кузь Р. В. Про особливості розвитку робіт по створенню термоелектричних рекуператорів для транспортних засобів // Термоелектрика, №5. - 2019.
2. https://opec.org/opec_web/en/press_room/28.htm
3. <https://yearbook.enerdata.ru>.
4. US3197342. A.B. Neild Jr. Заявл. 26.09.1961. Опубл. 27.07.1965.
5. Neild Jr. A.B. "Portable thermoelectric generators", Society of Automotive Engineers, New York, SAE-645A, 1963.
6. Birkholz U., Crob E., U. Stohrer, Voss K. Conversion of waste exhaust heat in automobiles using FeSi₂-thermoelements // Proc. 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion. – Arlington (USA). – 1988. – P. 124-128.
7. Fairbanks J. Vehicular Thermoelectric Applications. // Energy Efficiency Renewable Energy (EERE). – Rockville, Maryland (USA). – 2008.
8. Farmer J.C. White Paper for U.S. Army Rapid Equipping Force: Waste Heat Recovery with Thermoelectric and Lithium-Ion Hybrid Power System. // UCRL-TR-236780. – 2007.
9. Krommenhoek D., Ghamaty S., Bass J., Elsner N., Jovanovich V. Predicted Performance of Quantum Well Thermoelectrics for Power Generation. // 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). – San Diego, CA (USA). – 2006. – P. 1-8.
10. Bass J., Campana R., Elsner N. Thermoelectric Generator for Diesel Trucks. // In Proceedings of the 10th International Conference on Thermoelectrics, D.M. Rowe, ed., p. 127, UK, 1991.
11. Gruen D., Singh D., Routhbort J. Development of High-ZT Bulk Thermoelectric (New Program) // VT Merit Review. – 2008.
12. Ghamaty S., Bass J., Elsner N. Quantum Wells thermoelectric Devices for Diesel Engines. // 22th International Conference on Thermoelectrics ICT 2003. – Vol. 17, № 21. – 2003 P. 563 – 566.
13. Bass J., Elsner N., Leavitt F. Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines. // 13th International Conference on Thermoelectrics. – Vol. 316. – P. 295-298.
14. Elsner N., Bass J., Ghamaty S., Krommenhoek D., Kushch A., Snowden D. Diesel Truck Thermoelectric Generator. // Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2005 Progress Report. – P. 301-305.
15. Kush Aleksandr S., John S. Bass, Saeid Ghamaty, Norbert B. Elsner Thermoelectric development at Hi-Z technology // Proc. of 20th International Conference on Thermoelectrics, 2001, pp. 422 – 430.
16. J. C. Bass, Norbert B. Elsner, and F. A. Leavitt, "Performance of the 1kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines," AIP Conference Precedings, vol. 316, pp. 295-298, 1995.

17. Morelli, D.T., Potential applications of advanced thermoelectrics in the automobile industry. In Proceedings of the 15th International Conference on Thermoelectrics, J.-P. Fleurial, ed., 1996, - P.383-386.
18. J. C. Bass, Norbert B. Elsner. Current Thermoelectric Programs at Hi-Z Technology Inc. // Proc. of the 11th International Conference on Thermoelectrics, USA, 1992.
19. J. C. Bass, Norbert B. Elsner, S. Ghamaty. Application of Advanced Thermoelectric Technology to the Diesel Generator // DEER 1997, California, July, 1997. P. 157-161.
20. Ghamaty S., Elsner B. Si/SiGe Quantum Well Thermoelectric Materials and Devices for Waste Heat Recovery From Vehicles and Industrial Plants. // International Symposium on Nano-Thermoelectrics. – Osaka (Japan). – 2007. – P. 1-5.
21. Bass J., Kusch A., Elsner N. Thermoelectric Generator (TEG) for Heavy Diesel Trucks. // Proceedings ICT 2001 XX International Conference on Thermoelectrics. – Beijing (China). – 2001, P. 1-6.
22. Kushch A., Bass J., Ghamaty S., Elsner B. Thermoelectric Development at Hi-Z Thechnology. // Proceedings ICT 2001 XX International Conference on Thermoelectrics. – Beijing (China). – 2001, P. 422-430.
23. Patent US1235457.
24. Patent US2345633.
25. Patent US3345634.
26. Patent US4345634.
27. Kushch A., Karri M.A., Helenbrook B.F., Richter C., The Effects of an Exhaust Thermoelectric Generator of a GM Sierra Pickup Truck. Proc. of Diesel Engine Emission Reduction (DEER) Conference, California, USA, 2004.
28. Кадзикава Т. Современное состояние исследований и разработок в сфере технологии термоэлектрического генерирования в Японии // Термоэлектричество. – 2009. – № 1. – С. 18-30.
29. Ikoma K. at al. Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles. Proc. of the 17th International Conference on Thermoelectrics, 1988.
30. US6172427B1.
31. Кадзикава Т. Современное состояние технологии термоэлектрического генерирования энергии в Японии // Термоэлектричество. – 2007. – № 2. – С. 21-31.
32. Jamil I. Ghogel. Thermal and environmental assessment of a conceptual waste heat recovery system for automotive application // Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design, Melbourne, Australia, 15.-18.08.2005.
33. J.G. Haidar ; J.I. Ghogel. Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermoelectric generators // Proceedings ICT2001. 20 International Conference on Thermoelectrics (Cat. No.01TH8589).
34. Thacher E. F. , B. T. Helenbrook, M. A. Karri, C. J. Richter “Testing of an automobile thermoelectric generator in a light truck” // Proc. IMechE Vol. 221 Part D: J. Automobile

- engineering, pp. 95 – 107. 2007.
35. D. Crane. Potential thermoelectric application in diesel vehicles //Proc. DEER Conference, August 24-28, 2003. P. 1 – 6.
 36. LaGrandeur, J., Crane, D., Eder, A., “Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery”, DEER Conference, 2005, Chicago, IL, USA, 2005.
 37. Patent US7231772B2.
 38. Patent US6625990B2.
 39. Patent US7788933B2.
 40. Crane, D., Lagrandeur, J., Jovovic, V., Ranalli, M., Adldinger, M., Poliquin, E., Dean, J., Kossakovski, D., Mazar, B., Maranville, C. TEG on-vehicle performance model validation. In Directions in engine-efficiency and emissions research (DEER) conference 2012: October 16 – 19, 2012, Dearborn, USA.
 41. Crane D., Bell L. Progress Towards Maximizing the Performance of a Thermoelectric Power Generator. // Proc. ICT '06, 25th International Conference on Thermoelectrics. – Vienna (Austria). – P. 11-16.
 42. LaGrandeur J., Crane D., Hung S., Mazar B., Eder A. Automotive Waste Heat Conversion to Electric Power using Skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe. // Proc. 2006 International Conference on Thermoelectrics. – 2006. – P. 343-348.
 43. LaGrandeur J., Crane D., Bell L., Hung S., Mazar B., Eder A. High-Efficiency Thermoelectric Waste Energy Recovery System for Passenger Vehicle Applications. // Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2006 Progress Report. – P. 232-236.
 44. Bell L. Prospects for Broadened Use of Thermoelectrics in the Automotive Vehicles. // Proc. Next Generation Thermal Management Materials and Systems Conference. – Irving, Texas (USA). – 2002.
 45. Crane D., Bell L. Design to Maximize Performance of Thermoelectric Power Generator with a dynamic Thermal power Source. // J. Energy Resour. Technol. – 2009. – Vol. 131, № 1. – 8 p.
 46. LaGrandeur J. BSST Waste Heat Recovery Program // 2008 DOE FCVT Merit Review. – 2008.
 47. LaGrandeur J., Crane D., Bell L., Hung S., Mazar B., Eder A. High-Efficiency Thermoelectric Waste Energy Recovery System for Passenger Vehicle Applications. // Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2006 Progress Report. – P. 232-236.
 48. Bell L. High Power Density Thermoelectric Systems. // Proc. 23rd International Conference on Thermoelectrics. – 2004. – Adelaide, AU.
 49. LaGrandeur J., Crane D., Eder A. Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery // Proc. of Diesel Engine Emissions Reduction Conference. – Chicago (USA). – P. 1-7. – 2005.
 50. Bell L. Broader Use of Thermoelectric Systems in Vehicles. // Proc. 1th Thermoelectrics

- IAV Conference. – Berlin (Germany). – 2008. – P. 1-14.
51. Crane D. Potential Thermoelectric Applications in Diesel Vehicles. // Proc. of the 9th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference. – Newport, Rhode Island (USA). – 2003. – P. 1-6.
 52. Bell L., LaGrandeur J. High-Efficiency Thermoelectric Waste Energy Recovery System for Passenger Vehicle Applications. // Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2005 Progress Report. – PP. 287-290.
 53. Crane D., Bell L. Design to Maximize Performance of a Thermoelectric Power Generator with Dynamic Thermal Power Source. // Proc. of ES2007 Energy Sustainability 2007. – Long Beach, CA (USA). – P. 1-9.
 54. Fairbanks J.W. Thermoelectric applications in vehicles status 2008. // Proc. 6th European Conference on Thermoelectrics. – Paris (France). – 2008. – P. PL-01.
 55. Doug Crane, John Lagrandeur, Vladimir Jovovic, Marco Ranalli, Martin Adldinger, Eric Poliquin, Joe Dean, Dmitri Kossakovski, Boris Mazar, Clay Maranville. TEG On-Vehicle Performance and Model Validation and What It Means for Further TEG Development. Journal of ELECTRONIC MATERIALS DOI: 10.1007/s11664-012-2327-8. 2012.
 56. F. Frobenius, G. Gaiser, U. Rusche, B. Weller. Thermoelectric Generators for the Integration into Automotive Exhaust Systems for Passenger Cars and Commercial Vehicles. Journal of ELECTRONIC MATERIALS DOI: 10.1007/s11664-015-4059-z. 2015.
 57. Mikami M. Kobayashi K., Kawada T., Kubo K., Uchiyama N. Development of high-strength Fe₂VAl thermoelectric module designed for motorcycle // Proc. ICT 26th International Conference on Thermoelectrics. – Jeju (Korea). – 2007. – P. 345-348.
 58. Hatzikraniotis E., Zorbas K. Triandafyllis I., Paraskevopoulos K.M. Study of Thermoelectric Power Generators and Applications in a Small Sized Cars // ECT2008 is the 6th European Conference on Thermoelectrics. – Paris (France). – 2008. – P. P2-18.
 59. Zorbas K.T., Hatzikraniotis E., Paraskevopoulos K.M. Power and Efficiency Calculation in Commercial TEG and Application in Wasted Heat Recovery in Automobile // Proc. ECT2007 is the 5th European Conference on Thermoelectrics. – Odessa (Ukraine). – 2007.
 60. Wojciechowski K., Merkisz J., Fuc P., Lijewski P., Schmidt M. Study of Recovery of Waste Heat From the Exhaust of Automobile Engine // Proc. ECT2007 is the 5th European Conference on Thermoelectrics. – Odessa (Ukraine). – 2007.
 61. Patent WO12324654.
 62. Patent WO98651123.
 63. «Thermoelektrik-Eine Chance Fur Die Atomobillindustrie», Берлін 2008.
 64. ICT/ECT Joint Conference 2012, July 9-12, 2012, Aalborg, Denmark.
 65. Christian Häfele, Michael Schier, Steffen Hahn, Tobias Weiler, Horst Friedrich. Experimentelle Fahrzeug-Untersuchungen im Hinblick auf exergetische Potentiale und Gesamtsystemrückwirkungen bei der Integration Thermoelektrischer Generatoren / Thermoelectrics goes automotive. Jansch, Daniel (Hrsg.) Renningen : expert-Verl. 2011.

66. Sun-kook kim, Byeong-Cheol Won, Seok-Ho Rhi, Shi-Ho Kim, Jeong-Ho Yoo, Ju-Chan Jang. Thermoelectric Power Generation System for Future Hybrid Vehicles Using Hot Exhaust Gas // *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 40, No. 5, 2011. DOI: 10.1007/s11664-011-1569-1.
67. Nyambayar Baatar, Shiho Kim. A Thermoelectric Generator Replacing Radiator for Internal Combustion Engine Vehicles // *TELKOMNIKA*, Vol.9, No.3, December 2011, pp. 523~530.
68. D. Magnetto., G. Vidiella. Reduced Energy Consumption by Massive Thermoelectric Waste Heat Recovery in Light Duty Trucks // 9th European Conference on Thermoelectrics. AIP Conf. Proc. 1449, 471-474 (2012); doi: 10.1063/1.4731598
69. X. Liu, Y.D. Deng, S. Chen, W.S. Wang, Y. Xu, C.Q. Su. A case study on compatibility of automotive exhaust thermoelectric generation system, catalytic converter and muffler // *Case Studies in Thermal Engineering* 2 (2014) 62–66.
70. X. LiuY. D. DengW. S. WangC. Q. Su. Experimental Investigation of Exhaust Thermoelectric System and Application for Vehicle // *Journal of Electronic Materials*, June 2015, Volume 44, Issue 6, pp 2203–2210.
71. Zhang X., Chau K.T., Chan C.C. Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles // *Journal of Asian Electric Vehicles*. – 2008. – Vol. 6, № 2. – P. 1119-1124.
72. Andrea Montecucco, Jonathan Siviter, Andrew R. Knox. A combined heat and power system for solid-fuel stoves using thermoelectric generators // *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015. Energy Procedia* 75 (2015) 597 – 602.
73. Yanliang Zhang, Martin Cleary, Xiaowei Wang, Nicholas Kempf, Luke Schoensee, Jian Yang, Giri Joshi, Lakshmikanth Meda. High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery // *Energy Conversion and Management* 105 (2015) 946–950.
74. Waste heat recovery system with new thermoelectric materials. LIU-IEI-TEK-A--15/02289—SE. Jonas Coyet Fredrik Borgström. Master Thesis Department of Management and Engineering Linköping University, Sweden Linköping, June 2015.
75. 13th European Conference on Thermoelectrics. June 28 - July 2, 2015, Dresden
76. Henry Bosch. From Modules to a Generator: An Integrated Heat Exchanger Concept for Car Applications of a Thermoelectric Generator // *Journal of Electronic Materials*, Vol. 45, No. 3, 2016. DOI: 10.1007/s11664-015-4129-2.
77. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Vehicle Technologies Program, Multi-year Program Plan, 2011–2015, December 2010; US Department of Energy, Sunshot Vision Study, 2012.

Надійшла до редакції 27.12.2018

Кузь Р.В. канд. физ.-мат. наук

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatysh@gmail.com

**ТЕОРИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ГЕНЕРАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ОТХОДЫ ТЕПЛА
НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ**

Kuz R.V. cand. phys. - math. Sciences

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

**THERMOELECTRIC GENERATORS FOR VEHICLES.
ANALYSIS OF PRACTICAL ACHIEVEMENTS**

The paper presents the results of the analysis of experimental work related to the use of thermoelectric generators in conjunction with internal combustion engines in vehicles in order to obtain additional electrical energy and, accordingly, to save fuel. The progress and current state of the development of such generators are considered. Conclusions are made about the possibility and necessary conditions for the use of thermoelectric generators with internal combustion engines. Bibl. 21

Key words: thermoelectric generator, internal combustion engine, heat recovery.

References

1. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2019). About the peculiarities of progress in the works to create thermoelectric recuperators for vehicles. *J. Thermoelectricity*, 5.
2. https://opec.org/opec_web/en/press_room/28.htm
3. <https://yearbook.enerdata.ru>.
4. US3197342 A.B. Neild Jr. Filed 26.09.1961. Publ. 27.07.1965.
5. Neild Jr. A.B. (1963). Portable thermoelectric generators. *Society of Automotive Engineers*. New York, SAE-645A.

6. Birkholz U., Crob E., Stohrer U., Voss K. (1988). Conversion of waste exhaust heat in automobiles using FeSi₂-thermoelements. *Proc. 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion* (USA, Arlington, 1988, 124-128).
7. Farmer J.C. (2007). White paper for U.S. Army rapid equipping force: waste heat recovery with thermoelectric and lithium-ion hybrid power system. *UCRL-TR-236780*.
8. Krommenhoek D., Ghamaty S., Bass J., Elsner N., Jovanovich V. (2006). Predicted performance of quantum well thermoelectrics for power generation. *4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC)* (San Diego, CA, USA, 1-8).
9. Bass J., Campana R., Elsner N. (1991). Thermoelectric generator for diesel trucks. *Proc. 10th International Conference on Thermoelectrics* (UK, 1991).
10. Elsner N., Bass J., Ghamaty S., Krommenhoek D., Kushch A., Snowden D. (2005). Diesel truck thermoelectric generator. *Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2005 Progress Report*, 301-305.
11. Kush Aleksandr S., Bass John S., Ghamaty Saeid, Elsner Norbert B. (2001). Thermoelectric development at Hi-Z technology. *Proc. 20th International Conference on Thermoelectrics*, 422 – 430.
12. Bass J. C., Elsner Norbert B. and Leavitt F. A. (1995). Performance of the 1kW thermoelectric generator for diesel engines. *AIP Conference Proceedings*, 316, 295-298.
13. Morelli D.T. (1996). Potential applications of advanced thermoelectrics in the automobile industry. *Proc. of the 15th International Conference on Thermoelectrics*, P.383-386.
14. Bass J. C., Elsner Norbert B., Ghamaty S. (1997). Application of advanced thermoelectric technology to the diesel generator. *DEER* (California, July, 1997, 157-161).
15. Ghamaty S., Elsner B. (2007). Si/SiGe quantum well thermoelectric materials and devices for waste heat recovery from vehicles and industrial plants. *International Symposium on Nano-Thermoelectrics*. (Osaka, Japan, 1-5).
16. Bass J., Kusch A., Elsner N. (2001). Thermoelectric generator (TEG) for heavy diesel trucks. *Proc. ICT 2001 XX International Conference on Thermoelectrics*. (Beijing, China, 1-6).
17. Kushch A., Bass J., Ghamaty S., Elsner B. (2001). Thermoelectric development at Hi-Z Technology. *Proc. ICT 2001 XX International Conference on Thermoelectrics* (Beijing, China, 422-430).
18. Patent US1235457.
19. Patent US2345633.
20. Patent US3345634.
21. Patent US4345634.
22. Kushch A., Karri M.A., Helenbrook B.F., Richter C. (2004). The effects of an exhaust thermoelectric generator of a GM Sierra pickup truck. *Proc. Diesel Engine Emission Reduction (DEER) Conference* (California, USA).

23. Kajikawa T. (2009). Current state of research and developments in the sphere of technology of thermoelectric generation in Japan. *J. Thermoelectricity*, 1, 18-30.
24. Ikoma K., et al. (1988). Thermoelectric module and generator for gasoline engine vehicles. *Proc. 17th International Conference on Thermoelectrics*.
25. US Patent US6172427B1.
26. Kajikawa T. (2007). Current state of technology of thermoelectric energy generation in Japan. *J. Thermoelectricity*, 2, 21-31.
27. Ghogel Jamil I. (2005). Thermal and environmental assessment of a conceptual waste heat recovery system for automotive application. *Proc. ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design* (Melbourne, Australia, 15-18.08).
28. Haidar J.G., Ghogel J.I. (2001). Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermoelectric generators. *Proc. ICT2001 20 International Conference on Thermoelectrics* (Cat. No.01TH8589).
29. Thacher E. F., Helenbrook B.T., Karri M. A., Richter C. J. (2007). Testing of an automobile thermoelectric generator in a light truck. *Proc. IMechE Vol. 221 Part D: J. Automobile engineering*, 95 – 107.
30. Crane D. (2003). Potential thermoelectric application in diesel vehicles. *Proc. DEER Conference* (August 24-28, 2003, 1 – 6).
31. LaGrandeur J., Crane D., Eder A. (2005). Vehicle fuel economy improvement through thermoelectric waste heat recovery. *DEER Conference* (Chicago, IL, USA).
32. Patent US7231772B2.
33. Patent US6625990B2.
34. Patent US7788933B2.
35. Crane D., Lagrandeur J., Jovovic V., Ranalli M., Adldinger M., Poliquin E., Dean J., Kossakovski D., Mazar B., Maranville C. (2012). TEG on-vehicle performance model validation. In *Directions in engine-efficiency and emissions research (DEER) conference 2012* (October 16 – 19, 2012, Dearborn, USA).
36. Crane D., Bell L. (2006). Progress towards maximizing the performance of a thermoelectric power generator. *Proc. ICT '06, 25th International Conference on Thermoelectrics*. (Vienna, Austria, 11-16).
37. LaGrandeur J., Crane D., Hung S., Mazar B., Eder A. (2006). Automotive waste heat conversion to electric power using skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe. *Proc. 2006 International Conference on Thermoelectrics*, 343-348.
38. LaGrandeur J., Crane D., Bell L., Hung S., Mazar B., Eder A. (2006). High-efficiency thermoelectric waste energy recovery system for passenger vehicle applications. *Advanced Combustion Engine Technologies. FY 2006 Progress Report*, 232-236.
39. Bell L. (2002). Prospects for broadened use of thermoelectrics in the automotive vehicles. *Proc. Next Generation Thermal Management Materials and Systems Conference* (Irving, Texas, USA).
40. Crane D., Bell L. (2009). Design to maximize performance of thermoelectric power generator with a dynamic thermal power source. *J. Energy Resour. Technol.*, 131 (1), 8 p.

41. LaGrandeur J. (2008). BSST waste heat recovery program. *DOE FCVT Merit Review*.
42. LaGrandeur J., Crane D., Bell L., Hung S., Mazar B., Eder A. (006). High-efficiency thermoelectric waste energy recovery system for passenger vehicle applications. *Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2006 Progress Report*, 232-236.
43. Bell L. (2004). High power density thermoelectric systems. *Proc. 23rd International Conference on Thermoelectrics* (Adelaide, AU).
44. LaGrandeur J., Crane D., Eder A. (2005). Vehicle fuel economy improvement through thermoelectric waste heat recovery. *Proc. Diesel Engine Emissions Reduction Conference*. (Chicago, USA, 1-7).
45. Bell L. (2008). Broader use of thermoelectric systems in vehicles (2008). *Proc. 11th Thermoelectrics IAV Conference* (Berlin, Germany, 1-14).
46. Crane D. (2003). Potential thermoelectric applications in diesel vehicles. *Proc. of the 9th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference* (Newport, Rhode Island, USA, 1-6.)
47. Bell L., LaGrandeur J. (2005). High-efficiency thermoelectric waste energy recovery system for passenger vehicle applications. *Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2005 Progress Report*, 287-290.
48. Crane D., Bell L. (2007). Design to maximize performance of a thermoelectric power generator with dynamic thermal power source. *Proc. ES2007 Energy Sustainability*. (Long Beach, CA, USA, 1-9).
49. Fairbanks J.W. (2008). Thermoelectric applications in vehicles status 2008. *Proc. 6th European Conference on Thermoelectrics* (Paris, France, PL-01).
50. Crane Doug, Lagrandeur John, Jovovic Vladimir, Ranalli Marco, Adldinger Martin, Poliquin Eric, Dean Joe, Kossakovski Dmitri, Mazar Boris, Maranville Clay (2012). TEG on-vehicle performance and model validation and what it means for further TEG development. *J. Electronic Materials* DOI: 10.1007/s11664-012-2327-8. 2012.
51. Frobenius F., Gaiser G., Rusche U., Weller B. (2015). Thermoelectric generators for the integration into automotive exhaust systems for passenger cars and commercial vehicles. *J. Electronic Materials* DOI: 10.1007/s11664-015-4059-z. 2015.
52. Mikami M., Kobayashi K., Kawada T., Kubo K., Uchiyama N. (2007). Development of high-strength Fe₂VAl thermoelectric module designed for motorcycle. *Proc. ICT 26th International Conference on Thermoelectrics* (Jeju, Korea, 2007, 345-348).
53. Hatzikraniotis E., Zorbas K. Triandafyllis I., Paraskevopoulos K.M. (2008). Study of thermoelectric power generators and applications in a small sized cars. *ECT2008, the 6th European Conference on Thermoelectrics* (Paris, France, 2008, P2-18).
54. Zorbas K.T., Hatzikraniotis E., Paraskevopoulos K.M. (2007). Power and efficiency calculation in commercial TEG and application in wasted heat recovery in automobile. *Proc. ECT2007, the 5th European Conference on Thermoelectrics* (Odessa, Ukraine, 2007).
55. Wojciechowski K., Merkisz J., Fuc P., Lijewski P., Schmidt M. (2007). Study of recovery of waste heat from the exhaust of automobile engine. *Proc. ECT2007, the 5th European Conference on Ther-*

- moelectrics* (Odessa, Ukraine, 2007).
56. Patent WO12324654.
 57. Patent WO98651123.
 58. Thermoelektrik-Eine Chance Fur Die Atomobillindustrie (Berlin, 2008).
 59. *ICT/ECT Joint Conference 2012* (July 9-12, 2012, Aalborg, Denmark).
 60. Häfele Christian, Schier Michael, Hahn Steffen, Weiler Tobias, Horst Friedrich (2011). Experimentelle Fahrzeug–Untersuchungen im Hinblick auf exergetische Potentiale und Gesamtsystemrückwirkungen bei der Integration Thermoelektrischer Generatoren. *Thermoelectrics goes automotive*. Jänsch, Daniel (Hrsg.) Renningen : expert-Verl. 2011.
 61. Kim Sun-Kook, Won Byeong-Cheol, Rhi Seok-Ho, Kim Shi-Ho, Yoo Jeong-Ho, Jang Ju-Chan (2011). Thermoelectric power generation system for future hybrid vehicles using hot exhaust gas. *J.Electronic Materials*, 40(5). DOI: 10.1007/s11664-011-1569-1.
 62. Baatar Nyambayar, Kim Shiho (2011). A thermoelectric generator replacing radiator for internal combustion engine vehicles. *TELKOMNIKA*, 9(3), 523~530.
 63. Magnetto D., Vidiella G. (2012). Reduced energy consumption by massive thermoelectric waste heat recovery in light duty trucks. *9th European Conference on Thermoelectrics*. AIP Conf. Proc. 1449, 471-474 (2012); doi: 10.1063/1.4731598
 64. Liu X., Deng Y.D., Chen S., Wang W.S., Xu Y., Su C.Q. (2014). A case study on compatibility of automotive exhaust thermoelectric generation system, catalytic converter and muffler. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2, 62–66.
 65. Liu Y. X., Deng W. S. Wang C. Q. Su. (2015). Experimental investigation of exhaust thermoelectric system and application for vehicle. *J.Electronic Materials*, 44 (6), 2203–2210.
 66. Zhang X., Chau K.T., Chan C.C. (2008). Overview of thermoelectric generation for hybrid vehicles. *J. Asian Electric Vehicles*, 6(2), 1119-1124.
 67. Montecucco Andrea, Siviter Jonathan, Knox Andrew R.(2015). A combined heat and power system for solid-fuel stoves using thermoelectric generators.*The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015*. *Energy Procedia*, 75, 597 – 602.
 68. Zhang Yanliang, Cleary Martin, Wang Xiaowei, Kempf Nicholas, Schoensee Luke, Yang Jian, Joshi Giri, Meda LakshmiKanth (2015). High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 105, 946–950.
 69. Waste heat recovery system with new thermoelectric materials. LIU-IEI-TEK-A--15/02289—SE. Jonas Coyet Fredrik Borgström. *Master Thesis Department of Management and Engineering Linköping University*, Sweden Linköping, June 2015.
 70. *13th European Conference on Thermoelectrics* (June 28 - July 2, 2015, Dresden).
 71. Bosch Henry (2016). From modules to a generator: an integrated heat exchanger concept for car applications of a thermoelectric generator. *J. Electronic Materials*, 45(3). DOI: 10.1007/s11664-015-4129-2.

Submitted 27.12.2018

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

До опублікування у фаховому журналі приймаються наукові праці, які ніколи не друкувалися раніше. Стаття має бути написана на актуальну тему, містити результати глибокого наукового дослідження, новизну та обґрунтування наукових висновків відповідно до мети статті (поставленого завдання).

Матеріали, що публікуються в журналі, підлягають внутрішньому та зовнішньому рецензуванню, яке здійснюють члени редакційної колегії та міжнародної редакційної ради журналу або фахівці відповідної галузі. Рецензування проводиться конфіденційно, У разі негативної рецензії чи наявності суттєвих зауважень стаття може бути відхилена або повернута авторові (авторам) на доопрацювання. У випадку, коли автор (автори) не погоджується(ються) з думкою рецензента, за рішення редакційної колегії може бути проведене додаткове незалежне рецензування. Після внесення автором змін відповідно до зауважень рецензента статті підписується до друку.

Редакційна колегія має право на відмову у публікації рукописів, що містять опубліковані раніше дані, а також матеріалів, які не відповідають профілю журналу або матеріалів досліджень, що були проведені з порушенням етичних норм (наприклад, конфлікти між авторами чи між авторами і організацією, плагіат і т. ін.). Редакційна колегія журналу залишає за собою право редагувати та скорочувати рукописи без порушення авторського змісту. Відхилені рукописи авторам не повертаються.

Подання рукопису до журналу

Рукопис статті подається до редакції журналу в паперовому варіанті у двох примірниках та в електронному вигляді на електронному носії (диск, флешка). Електронний варіант статті повинен повністю відповідати паперовому варіанту. Рукопис має бути підписаний всіма співавторами або відповідальним представником.

В окремих випадках допускається замість електронного носія (диск, флешка) направляти статтю електронною поштою.

Рукописи подаються англійською мовою для англомовних авторів. Для російськомовних та україномовних авторів - англійською мовою і, відповідно, російською чи українською. Формат сторінок А4. Кількість сторінок – не більше 15 (разом з літературою та розширеними анотаціями). За узгодженням з редакцією число сторінок може бути збільшено.

До рукопису додається:

- 1.Офіційний лист-направлення, підписаний керівником установи, де виконувалась робота.
2. Ліцензійний договір про передачу авторського права (форму договору можна отримати в редакції журналу або завантажити з сайту журналу – Договір.pdf). Ліцензійний договір набуває чинності після прийняття статті до друку. Підписання ліцензійного договору автором(ами) означає, що вони ознайомлені і згодні з умовами договору.
3. Відомості про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, вчене звання, вчена ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID (за наявності). Відомості про авторів подаються:
авторами з України трьома мовами – українською, російською та англійською;
авторами з країн СНД двома мовами – російською та англійською;
авторами з далекого зарубіжжя – англійською мовою.
4. Носій інформації з текстом статті, рисунками, таблицями, відомостями про авторів в електронному вигляді.
5. Кольорова фотографія автора(ів). Чорно-білі фотографії редакція журналу не приймає. При числі авторів більше двох їх фотографії не наводяться.

Вимоги до оформлення статті

Стаття має бути структурована за такими розділами:

- *Вступ*. Містить постановку проблеми, актуальність обраної теми, аналіз останніх досліджень і публікацій, мета і завдання.

- *Виклад основного матеріалу* дослідження і отриманих результатів.

- *Висновки*, де підведені підсумки роботи і перспективи подальших досліджень у цьому напрямі.

- *Список використаної літератури*.

Перша сторінка статті містить інформацію:

1. у верхньому лівому куті – індекс УДК (для авторів з України та країн СНД);
2. прізвище(а) та ініціали, вчена ступінь та вчене звання автора(ів);
3. назва установи, де працює автор(и); поштова адреса, номер телефону, адреса електронної пошти автора(ів);
4. назва статті;
5. анотація до статті – не більше 1 800 знаків. Анотація повинна відображати послідовну логіку опису результатів та описувати основні цілі дослідження, підсумовувати найбільш значимі результати;
6. ключові слова – не більше 8-ми слів.

Текст статті друкується шрифтом Times New Roman розміром 11 пт, міжрядковий інтервал 1.2 на папері формату А4, вирівнювання по ширині. У статті не повинно бути переносів слів.

Параметри сторінки: «дзеркальні поля» верхнє поле – 2.5 см, нижнє поле – 2.0 см, всередині – 2,0 см, ззовні – 3,0 см, від краю до колонтитула верхнього та нижнього – 1.27 см.

Графічні матеріали, фотографії подаються кольоровими, як виняток чорно – білими, у форматах .orj чи .cdr, допускається у форматах .jpg чи .tif. За бажанням автора таблиці і частина тексту також можуть бути кольоровими.

Рисунки друкуються на окремих сторінках. Текст на рисунках повинен бути виконаний шрифтом 10 пт. На графіках одиниці виміру вказуються через кому. Рисунки нумеруються в порядку їх розташування в тексті, частини рисунків нумеруються літерами – а, б, .. На звороті рисунка олівцем пишеться назва статті, автор(автори), номер рисунка. Скановані рисунки і графіки вставляти не допускається.

Таблиці подаються на окремих сторінках та повинні бути виконані з використанням табличного редактора MSWord. Використання символів псевдографіки для оформлення таблиць недопустиме.

Формули необхідно набирати у редакторах формул Equation або MatType. Статті з формулами, вписаними від руки, до друку не приймаються. Необхідно давати визначення (дефініцію) величин, які вперше вживаються у тексті, а далі користуватись відповідним терміном.

Підписи до рисунків і таблиць друкуються в рукописі після списку літератури.

Список використаних літературних джерел наводиться у кінці статті. Посилання на літературні джерела нумеруються послідовно в порядку їх цитування у тексті статті. Посилання на неопубліковані та незавершені роботи недопустимі.

Увага! У зв'язку із включенням журналу до міжнародних бібліографічно-реферативних баз даних, список літератури має складатися з двох блоків: ЛІТЕРАТУРА і REFERENCES (ця вимога діє і для англomовних статей):

ЛІТЕРАТУРА – джерела мовою оригіналу, оформлені відповідно до українського стандарту бібліографічного опису ДСТУ 8302:2015. За допомогою VAK.in.ua (<http://vak.in.ua>) Ви можете

автоматично, швидко і легко оформити Ваш «Список використаних джерел» відповідно до вимог Державної атестаційної комісії (ДАК) України та оформити посилання на наукові джерела в Україні зрозуміло та уніфіковано. У цьому порталі полегшено процедури оформлення наукових джерел при написанні Ваших публікацій, дисертацій та інших наукових робіт.

REFERENCES – той же список літератури, транслітерований в романському алфавіті (рекомендації за міжнародним бібліографічним стандартом APA-2010, правила до оформлення транслітерованого списку літератури References на сайті <http://www.dse.org.ua>, розділ для авторів).

Для пришвидшення публікації статті просимо дотримуватись наступних правил:

- У верхньому лівому куті першої сторінки статті – індекс УДК;
- ініціали та прізвище авторів;
- науковий ступінь, учене звання;

з нового рядка шрифтом Times New Roman розміром 12 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру;

- назва організації, адреса (вулиця, місто, індекс, країна), електронна адреса авторів;

з нового рядка на 1 см нижче ініціалів та прізвища авторів шрифтом Times New Roman розміром 11 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру;

о назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, заголовними буквами напівжирним шрифтом New Roman розмір 12 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру. Назва статті має бути конкретною і по можливості короткою;

- анотація розміщується на 1 см нижче назви статті шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, курсивом, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по ширині українською чи російською (для україномовних та російськомовних авторів відповідно) та англійською мовами;

- ключові слова розміщуються нижче анотації шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по ширині. Мова ключових слів відповідає мові анотації. Заголовок «Ключові слова» - шрифт Times New Roman, розмір 10 пт, напівжирний;

- основний текст статті розміщується на 1 см нижче анотації з абзацу 1 см, шрифт Times New Roman, розмір 11 пт, міжрядковий інтервал 1,2 вирівнювання по ширині;

формули набирають у редакторі формул шрифтами: Symbol, Times New Roman. Розмір шрифтів: «звичайний» - 12 пт, «крупний індекс» - 7 пт, «дрібний індекс» - 5 пт, «крупний символ» - 18 пт, «дрібний символ» - 12 пт). Формула розміщується по тексту, вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка, нумерація формул у круглих дужках справа;

- розмірності всіх величин, що використовуються в статті, подаються в системі СІ, використовувані символи повинні бути пояснені;

- рисунки розміщуються по тексту. Рисунки та фотографії повинні бути чіткими і контрастними; осі графіків - паралельними до країв листка, усуваючи тим самим можливість появи зрушення кутів при масштабуванні; рисунки у журнал подаються кольоровими, чорно-білі - редакція журналу не приймає;

- таблиці розміщують по тексту. Ширина таблиці повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею вказують її порядковий номер, вирівнювання по правому краю. Нумерація таблиць по всьому тексту статті наскрізна. Назва таблиці розміщується під її номером, вирівнювання по центру;

• список літератури наводять у кінці статті. Посилання на літературу вказують за текстом в квадратних дужках. Послідовність джерел у списку літератури має відповідати порядку їх згадування в тексті. Нижче наведені приклади різних типів посилань на літературу.

Приклади оформлення посилань на літературні джерела для ЛІТЕРАТУРИ

Статті в журналах

Анатичук Л.І., Михайловський В.Я., Максимук М.В., Андрусак І.С. Експериментальні дослідження термоелектричного автомобільного передпускового нагрівача на дизельному паливі. *Термоелектрика*. 2016. №4. С.84–94.

Книги

Анатичук Л.І. *Термоелементи и термоэлектрические устройства. Справочник*. Киев, Наукова думка, 1979. 768 с.

Патенти

Патент України № 85293. Анатичук Л.І., Лусте О.Я., Ніцович О.В. Термоелемент

Матеріали конференцій

Лисько В.В. *Современное состояние и ожидаемый прогресс в метрологии термоэлектрических материалов*. Матеріали XVII Міжнародного форуму по термоелектричеству (14-18 мая 2017, г. Белфаст), Черновці, 2017. 64 с.

Автореферати дисертацій

Кобиланський Р.Р. *Термоелектричні прилади для лікування захворювань шкіри.*: автореф. дис. фіз.-мат. наук. Чернівці, 2011. 20 с.

Приклади оформлення посилань на літературні джерела для REFERENCES

Статті в журналах

Gorskiy P.V. (2015). Ob usloviakh vysokoi dobrotnosti i metodika poiska perpektivny sverhreshetochny termoelektricheskikh materialov [On the conditions of high figure of merit and methods of search for promising superlattice thermoelectric materials]. *Termoelektrichestvo - J.Thermoelectricity*, 3, 5 – 14 [in Russian].

Книги

Anatychuk L.I.. (2003). *Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.

Патенти

Patent of Ukraine № 85293. Anatychuk L. I., Luste O.Ya., Nitzovych O.V. Thermoelements [In Ukrainian].

Матеріали конференцій

Rifert V.G.. Intensification of heat exchange at condensation and evaporation of liquid in 5 flowing-down films. In: *Proc. of the 9th International Conference Heat Transfer*. May 20-25, 1990, Israel.

Автореферати дисертацій

Mashukov A.O. *Efficiency hospital state of rehabilitation of patients with color cancer*. Phd (Med.) Odesa, 2011 [In Ukrainian].