



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: anatyach@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.

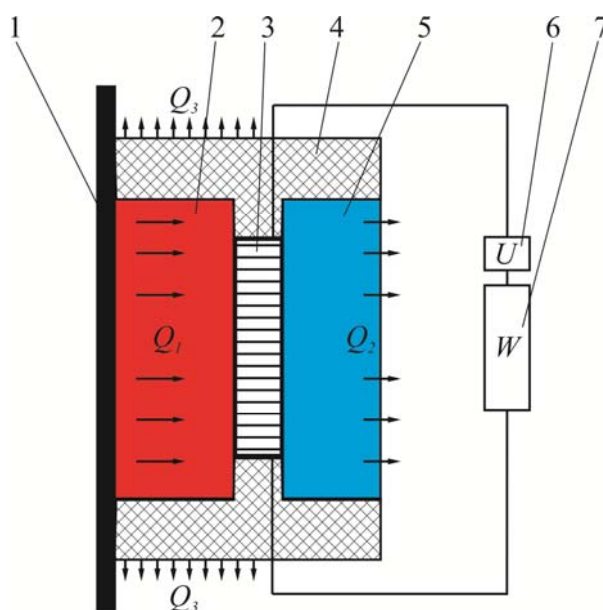


Рис. 1. Фізична модель блока термоелектричного генератора: 1 – нагріта поверхня; 2 – гарячий теплообмінник; 3 – термоелектричний модуль; 4 – теплоізоляція; 5 – холодний теплообмінник; 6 – стабілізатор напруги; 7 – акумулятор електричної енергії.

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:

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

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

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).

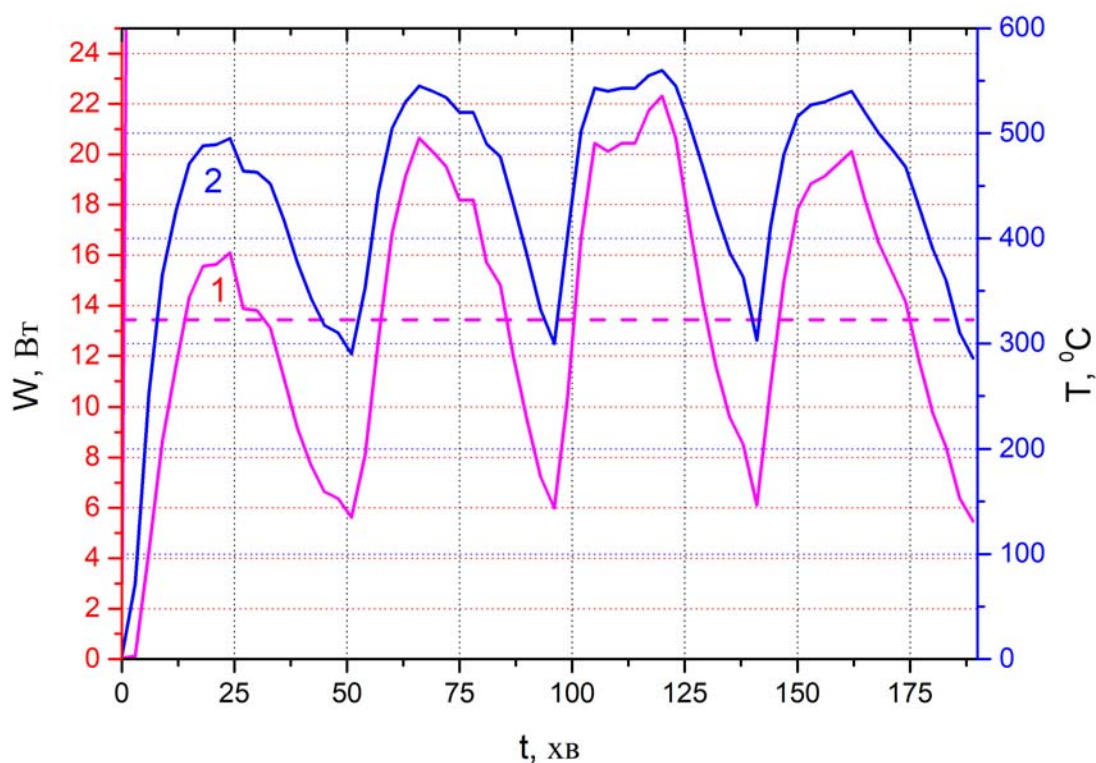
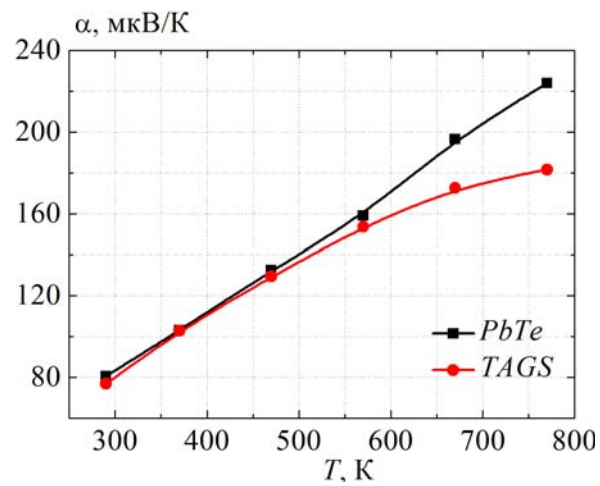
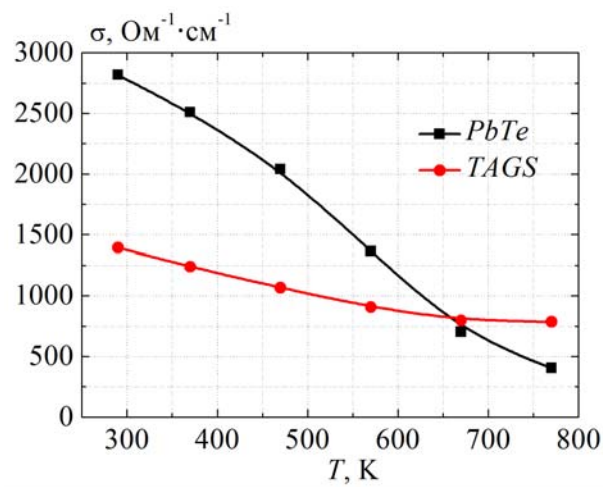


Рис. 2. Залежність потужності ТЕГ розміщеного на задній поверхні пічки від часу: 1 – потужність ТЕГ при $T_x=30^\circ$, 2 – температура поверхні пічки.

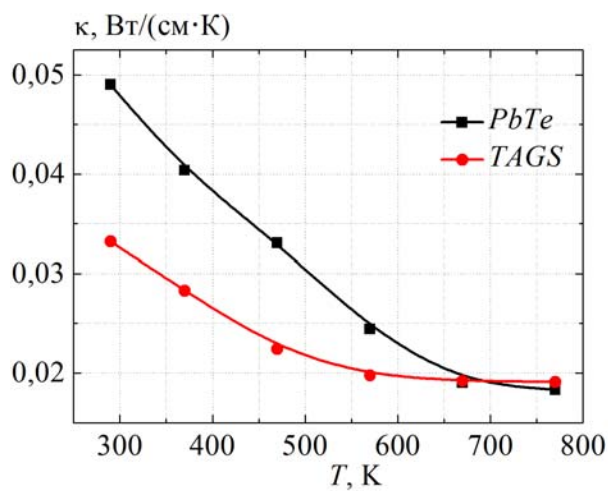
У якості термоелектричних перетворювачів для ТЕГ використано 1 термоелектричний модуль із матеріалу на основі $PbTe$ n -типу провідності та $GeTe-AgSbTe$ (TAGS) p -типу провідності. Характеристики такого матеріалу, виготовленого в Інституті термоелектрики НАН і МОН України, наведено на рис. 3.



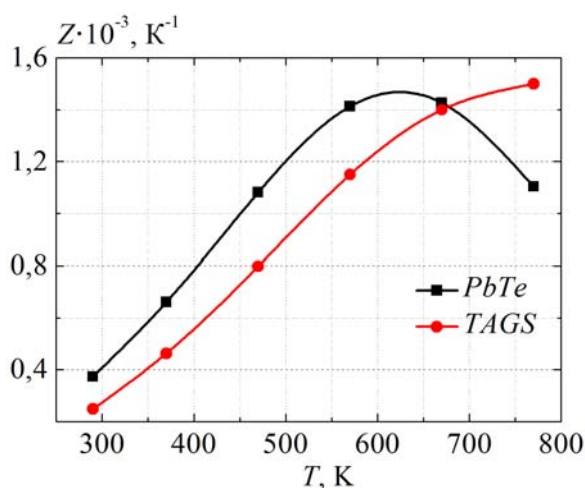
a)



б)



в)



г)

Рис. 3. Температурні залежності термоелектричних матеріалів на основі *n*-PbTe і *p*-TAGS: а) коефіцієнт термоЕРС;

б) електропровідність; в) теплопровідність; г) 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 $T_x = 30$ °C), 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}

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

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

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ 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, 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. Anatychuk 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