

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

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна, e-mail: anatykh@gmail.com

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ З ПОЛУМ'ЯНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛА ЗМІННОЇ ПОТУЖНОСТІ І СТАБІЛІЗАТОРАМИ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕРМОБАТАРЕЙ

У роботі виконано розрахунки динамічної потужності термоелектричного генератора з полум'яними джерелами тепла змінної потужності. Наводяться результати експериментальних досліджень температурних режимів роботи печей, що використовують тверде паливо, а також оцінки можливостей підвищення вихідної потужності термоелектричного генератора. Бібл. 8, рис. 5.

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

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Для живлення різноманітної малопотужної апаратури зазвичай використовують хімічні джерела струму. Проте, поряд із беззаперечними перевагами, їх використання пов'язане із певними недоліками – наявністю саморозряду, малим ресурсом роботи, обмеженим терміном зберігання та експлуатації за умов низьких температур, а також проблеми їх утилізації [1, 2].

Вказаних недоліків позбавлені термоелектричні генератори (ТЕГ) із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі, зокрема на дровах та пресованих брикетах, що широко використовуються для обігріву приміщень і приготування їжі, особливо у сільській місцевості та віддалених районах [2, 3].

Серійне виробництво термоелектричних генераторів із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі здійснюється багатьма виробниками, зокрема російськими компаніями «Кріотерм» та «Термофор» [4, 5] розроблено термоелектричні печі електричною потужністю 25 - 50 Вт, що призначені для освітлення, живлення малопотужних побутових приладів, зарядки акумуляторів, а також опалення приміщень площею до 50 м² [4, 5]. Китайською компанією «Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd.» розроблено серію термогенераторів потужністю 15 - 45 Вт [6]. Загальним підходом при розробці таких термогенераторів є використання термоелектричних модулів, виготовлених 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.

Крім того, як показує аналіз температури, при проектуванні ТЕГ використовуються фізичні моделі із постійною температурою джерела тепла, що не відповідає реальній ситуації. Під час роботи печі температура її поверхні динамічно змінюється, що відображається на вихідній потужності ТЕГ.

Метою даної роботи є розробка теорії та методів проектування термоелектричного генератора із нестабільними джерелами тепла змінної потужності, зокрема на дровах.

Фізична модель

У розрахунках використано фізичну модель блока термоелектричного генератора (рис. 1), яка містить нагріту поверхню джерела тепла змінної потужності 1, стабілізатор температури, що відсікає температури на гарячій поверхні термоелектричного генератора вище 300 °С 2, теплообмінники для підведення 3 та відведення 6 теплового потоку до/від термоелектричного модуля 4, теплову ізоляцію 5, стабілізатор електричної напруги 7 та акумулятор електричної енергії 8.

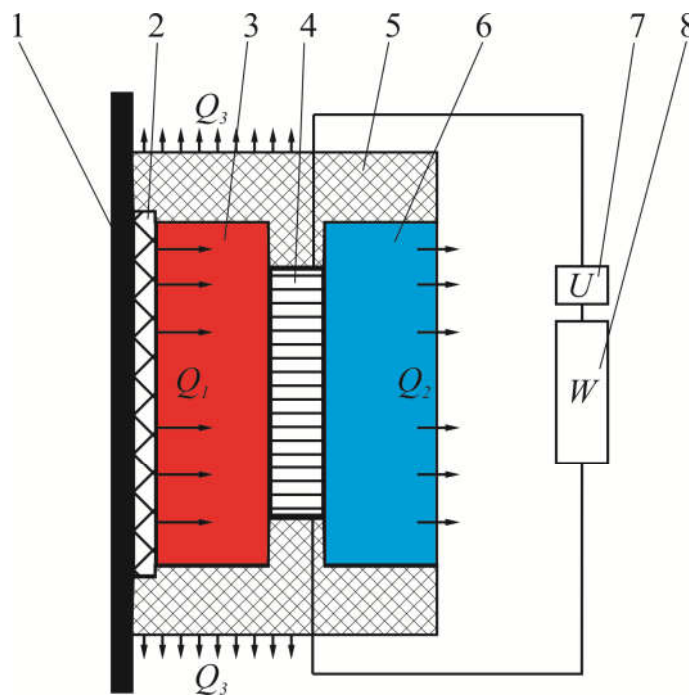


Рис. 1. Фізична модель блоку термоелектричного генератора:

1 – нагріта поверхня; 2 – стабілізатор температури; 3 – гарячий теплообмінник;

4 – термоелектричний модуль; 5 – теплоізоляція; 6 – холодний теплообмінник;

7 – стабілізатор напруги; 8 – 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 1, використовуються експериментальні залежності її температури від часу при реальному циклі використання джерела тепла на твердому паливі (рис. 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 (рис. 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:

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

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

де χ_1, χ_2 – теплові опори гарячого і холодного теплообмінників; T_T, 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 [7]. 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.

Експериментальні дослідження теплових режимів джерела тепла змінної потужності

Для визначення реальних температурних умов на нагрітих поверхнях пічок із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі (дровах) проведено експериментальні дослідження із використанням пічки зображеної на рис. 2.

У ході експерименту визначено залежності температур нагрітих поверхонь пічки від часу, протягом якого із рівними інтервалами відбувалося додавання однакової кількості дров. Загальний час експерименту склав 3.2 години. Дрова у кількості 5 кг деревини породи «верба» додавалися із інтервалом часу 50 хв.

На рис. 3 наведено результати вимірювань температури гарячих поверхонь пічки. Криві 1 та 2 на рис.3 відповідають температурам бічних поверхонь пічки, а крива 3 – задньої поверхні пічки. I, II, III, IV – інтервали часу протягом яких відбувалося додавання дров у пічку.

Як видно з рис. 3 температура поверхонь пічок циклічно змінювала відповідно до інтервалів додавання дров. При чому, температури бічних поверхонь (криві 1 і 2 на рис. 3) не перевищують 430 °С, а температура задньої поверхні пічки (крива 3 на рис.3) досягає значень ~ 600 °С.

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.



Рис. 2. Зовнішній вигляд пічки

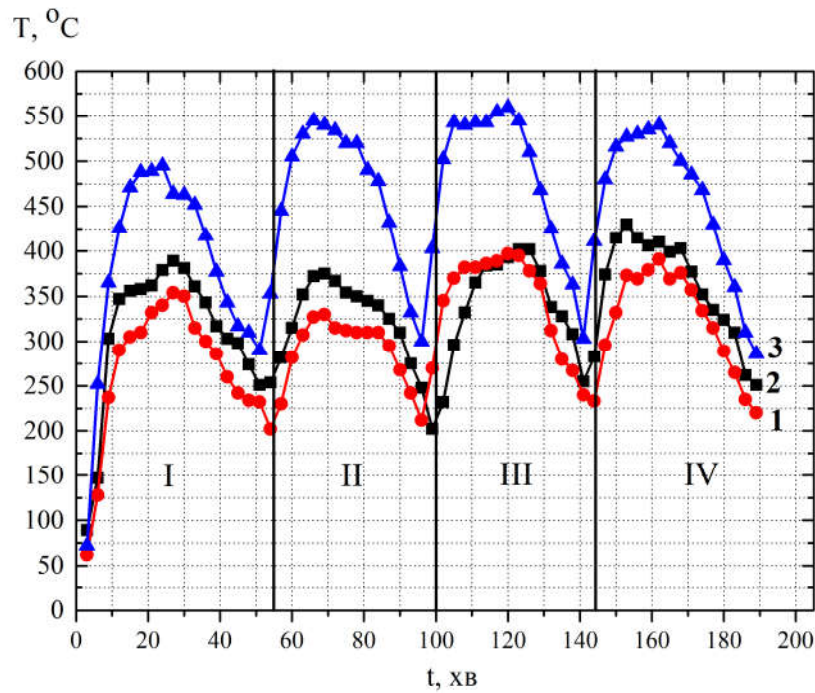


Рис. 3. Експериментальні залежності температури нагрітих поверхнь пічки від часу: 1, 2 – температури бічних поверхнь пічки, 3 – температура задньої поверхні пічки

Опис динамічних потужностей ТЕГ

Таким чином, використовуючи комп'ютерні методи, проведено розрахунок динамічних потужностей ТЕГ за умов його встановлення на бічній і задній поверхнях пічки (рис. 4, 5).

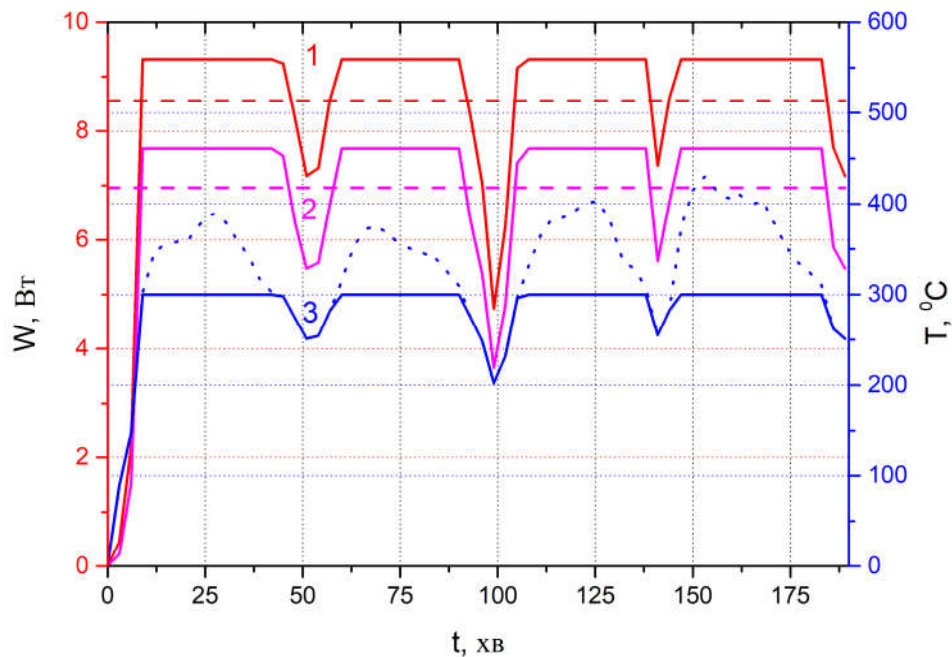


Рис. 4. Залежність потужності ТЕГ розміщеного на бічній поверхні пічки від часу: 1 – потужність ТЕГ при $T_{\text{Х}}=30^{\circ}\text{C}$, 2 – потужність ТЕГ при $T_{\text{Х}}=50^{\circ}\text{C}$; 3 – температура поверхні пічки.

У якості термоелектричних перетворювачів для ТЕГ використано 1 термоелектричний модуль АЛТЕК - 1061 із матеріалу на основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3). Характеристики такого модуля наведено в [8]. Його гранична «гаряча» температура становить 300°C . Тому, відповідно до фізичної моделі (рис.1), між поверхнею гарячої стінки і ТЕГ знаходиться стабілізатор температури, що відсікає температури, які перевищують 300°C .

На рис.4 наведено залежність потужності ТЕГ, розміщеного на бічній поверхні пічки, від часу для температур холодної сторони ТЕГ $T_{\text{х}}=30^\circ\text{C}$ (1 на рис.4) і $T_{\text{х}}=50^\circ\text{C}$ (2 на рис.4). Температура гарячої сторони ТЕГ показана суцільною кривою 3 на рис.4, а температура бічної поверхні пічки – пунктирною кривою на рис.4.

Як видно із рис.4, характер залежності динамічної потужності від часу в цілому відтворює залежності температури поверхні пічки. Для випадку температур холодної сторони $T_{\text{х}}=30^\circ\text{C}$ усереднене значення потужності ТЕГ, що складається із одного термоелектричного модуля, за вибраний відрізок часу становить 8.6 Вт, а для $T_{\text{х}}=50^\circ\text{C}$ – 7 Вт. При цьому енергія, що генерується ТЕГ у розрахунку на 1 год, становить ~ 30 кДж для $T_{\text{х}}=30^\circ\text{C}$ і ~ 25 кДж для $T_{\text{х}}=50^\circ\text{C}$.

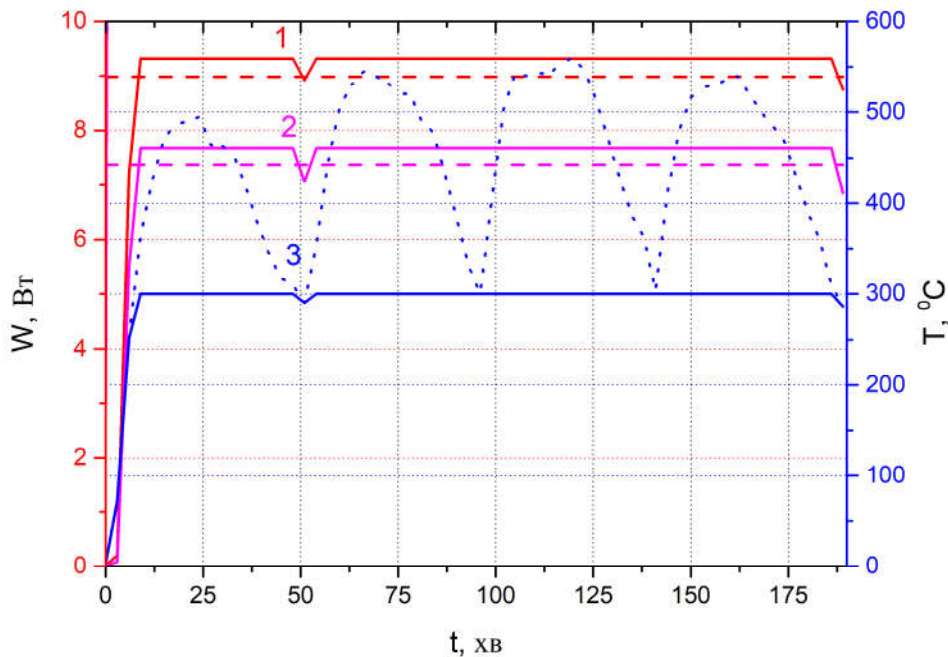


Рис. 5. Залежність потужності ТЕГ розміщеного на задній поверхні пічки від часу:

1 – потужність ТЕГ при $T_{\text{х}}=30^\circ\text{C}$, 2 – потужність ТЕГ при $T_{\text{х}}=50^\circ\text{C}$;

3 – температура поверхні пічки.

На рис. 5 наведено аналогічну залежність потужності ТЕГ, розміщеного на задній поверхні пічки, від часу для температур холодної сторони ТЕГ $T_{\text{х}}=30^\circ\text{C}$ (1 на рис.5) і $T_{\text{х}}=50^\circ\text{C}$ (2 на рис. 5). Температура гарячої сторони ТЕГ показана суцільною кривою 3 на рис. 4, а температура задньої поверхні пічки – пунктирною кривою на рис.4.

Як видно із рис. 4, характер залежності динамічної потужності від часу в цілому відтворює залежності температури поверхні пічки. Для випадку температур холодної сторони $T_{\text{х}}=30^\circ\text{C}$ усереднене значення потужності ТЕГ, що складається із одного термоелектричного модуля, за вибраний відрізок часу становить 9 Вт, а для $T_{\text{х}}=50^\circ\text{C}$ – 7.4 Вт. При цьому енергія, що генерується ТЕГ у розрахунку на 1 год, становить ~ 32 кДж для $T_{\text{х}}=30^\circ\text{C}$ і ~ 27 кДж для $T_{\text{х}}=50^\circ\text{C}$.

Таким чином, попри значні відмінності між температурами бічних і задньої стінок печі, потужності ТЕГ для першого і другого випадків відрізняються лише на $\sim 5\%$, що пов'язано із використанням стабілізатора температури гарячої сторони ТЕГ.

Однак, якщо проаналізувати криві 3 на рис. 4 і 5, стає зрозуміло, що така вимушена стабілізація температури поверхні печі веде до значних втрат у потужності ТЕГ. Ці втрати можна оцінити, адже, як уже зазначалося, характер залежності динамічної потужності від часу в цілому відтворює залежності температури поверхні пічки. І якщо допустити, що ми будемо використовувати замість стабілізованої температури (суцільна синя лінія 3 на рис.4 і 5) всю температуру поверхні печі (пунктирна синя лінія 3 на рис.4 і 5), то виграш у вихідній потужності ТЕГ становитиме $\sim 30 - 40\%$.

Отже, для подальшого покращення якості термоелектричних генераторів, що використовують полум'яні джерела тепла змінної потужності на твердому паливі, важливим є дослідження направленні на пошук можливостей використання повної теплової потужності печей, зокрема розробка ТЕГ із високотемпературних матеріалів, а також використання каскадних генераторів, оптимізованих на необхідні інтервали температур.

Висновки

1. Визначено експериментальні залежності динамічної температури гарячих поверхонь пічки для спалювання дров, в режимі її циклічного використання.
2. На основі експериментальних даних, розраховано динамічну потужність ТЕГ із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі із стабілізаторами температури термобатарей. Усереднене значення потужності ТЕГ, який складається із одного термоелектричного модуля, встановленого на задній поверхні печі, у заданому часовому відрізку становить 9 Вт (за температури його холодної сторони $T_x = 30^\circ\text{C}$).
3. Встановлено, що вимушена стабілізація температури поверхні печі веде до значних втрат у потужності ТЕГ, які досягають $\sim 30 - 40\%$.
4. Проаналізовано можливості покращення якості термоелектричних генераторів, що використовують полум'яні джерела тепла змінної потужності на твердому паливі, зокрема за рахунок розробки ТЕГ із високотемпературних матеріалів, а також використання каскадних генераторів, оптимізованих на необхідні інтервали температур.

Література

1. Бубнов Ю.И., Орлов С.Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации. Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ. 2005.
2. 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.
3. Вихор Л.М., Максимук М.В. Проектування термоелектричних каскадних модулів для ТЕГ на твердому паливі // Термоелектрика. – 2017. №4. – С 40 – 48.
4. <http://www.energopech.ru>
5. <http://kryothermtec.com/ru>
6. Thermonamic electronic (Jiangxi) Corp. Ltd. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thermonamic.com> (дата обращения: 05.09.2018).
7. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
8. <http://www.ite.inst.cv.ua>

Надійшла до редакції: 30.04.2018

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

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України,
ул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
²Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского 2,
Чернівці, 58012, Україна, e-mail: anatykh@gmail.com

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПЛАМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА ПЕРЕМЕННОЙ МОЩНОСТИ И СТАБИЛИЗАТОРАМИ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОБАТАРЕЙ

В работе выполнены расчеты динамической мощности термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла переменной мощности. Приведены результаты экспериментальных исследований температурных режимов работы печей, использующих твердое топливо, а также оценки возможностей повышения выходной мощности термоэлектрического генератора. Библиограф. 8, рис. 5.

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

**Anatykhuk L.I. acad. National Academy of Sciences of Ukraine^{1,2},
Maksimuk M.V.¹, Prybyla A.V. Candidate Phys.-math. Sciences^{1,2},
Rozver Yu.Yu.¹**

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, 58000, Ukraine,
e-mail: anatykh@gmail.com

THERMOELECTRIC GENERATORS WITH FLAME HEAT SOURCES OF VARIABLE POWER AND TEMPERATURE STABILIZERS FOR THERMOPILES

In this paper, the calculations of the dynamic power of a thermoelectric generator with flame heat sources of variable power are made. The results of experimental studies of temperature operating modes of furnaces using solid fuels are presented, as well as an assessment of the possibilities of increasing the output power of a thermoelectric generator. Bibl. 8, Fig. 5.

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

References

1. Bubnov Yu.I., Orlov S.B. (2005). Germetichnyiye knicheskiie istochniki toka: *Elementy i akkumulyatory. Oborudovaniie dlia ispytaniy i ekspluatatsii. [Sealed chemical sources of current: Elements and batteries. Testing and operating equipment]*. Saint-Petersburg: Khimizdat [in

- Russian].
2. Anatyshuk L.I., Mocherniuk R.M., Havryliuk M.V., Andrusiak I.S. (2017). Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces. *J. Thermoelectricity*, 2, С 84 – 95.
 3. Vikhor L.M., Maksimuk M.V. (2017). Design of thermoelectric cascade modules for solid fuel TEG. *J. Thermoelectricity*, 4, 40 – 48.
 4. <http://www.energopech.ru>
 5. <http://kryothermtec.com/ru>
 6. Thermonamic electronic (Jiangxi) Corp. Ltd. Retrieved from: <http://www.thermonamic.com> (application date: 05.09.2018).
 7. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
 8. <http://www.ite.inst.cv.ua>

Submitted: 30.04.2018