

УДК 536.24



Анатычук Л.И.

Анатычук Л.И., *акад. НАН Украины*<sup>1,2</sup>  
Прибыла А.В., *канд. физ.-мат. наук*<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет  
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,  
Черновцы, 58012, Украина



Прибыла А.В.

---

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПЛАМЕННЫМИ  
ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА ПЕРЕМЕННОЙ МОЩНОСТИ,  
ДВУХКАСКАДНЫМИ ТЕРМОБАТАРЕЯМИ И  
АККУМУЛЯТОРАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

---

*В работе выполнены расчеты динамической мощности двухкаскадного термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла переменной мощности. Приводятся результаты расчетов такого генератора с каскадами, изготовленными из материалов на основе систем Bi-Te и Si-Ge. Библ. 6, рис. 2.*

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

## **Введение**

*Общая характеристика проблемы.* Одним из факторов, ограничивающих широкое практическое применение термоэлектрических генераторов (ТЭГ), является низкая эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую, обусловленная использованием в конструкции ТЭГ однокаскадных модулей с низким значением безразмерной добротности термоэлектрических материалов  $ZT = 1.0 - 1.6$  [1 – 3]. Один из способов повышения КПД термоэлектрического преобразования состоит в расширении диапазона рабочих температур модуля путем каскадирования [4]. Для создания генераторных модулей, оптимизированных на уровень рабочих температур 30 - 600 °С рационально использовать двухкаскадную схему с термоэлементами на основе *Bi-Te* *n*- и *p*- типов проводимости в низкотемпературном каскаде (до 300 °С) и, соответственно, термоэлементами на основе *Si-Ge*, обеспечивающими высокую эффективность в высокотемпературном каскаде (300 - 600 °С).

В Институте термоэлектричества НАН и МОН Украины разработаны специализированные термоэлектрические модули из таких материалов для каждого из каскадов ТЭГ. Однако до сих пор не проведены расчеты параметров ТЭГ, использующего схему с термоэлементами на основе *Bi-Te* в низкотемпературном каскаде и *Si-Ge* – в высокотемпературном, в режиме, приближенном к его реальной эксплуатации. Важным остается также вопрос правильного согласования каскадов ТЭГ.

Итак, целью данной работы являются расчеты динамических рабочих характеристик двухкаскадного термоэлектрического генератора с источниками тепла переменной мощности в диапазоне температур 30-600 °С.

## Физическая модель

В расчетах использована физическая модель блока термоэлектрического генератора (рис. 1). Она включает нагретую поверхность источника тепла переменной мощности 1, теплообменники 2 для подвода теплового потока к модулю 3 высокотемпературного каскада ТЭГ, изготовленного из термоэлектрического материала на основе *Si-Ge* [5], и теплообменники 7 для отвода теплового потока от двух модулей 5 низкотемпературного каскада ТЭГ, изготовленных из стандартного термоэлектрического материала на основе *Bi-Te* [5], тепловыравнивающую пластину 4, тепловую изоляцию 6, стабилизатор электрического напряжения 8 и аккумулятор электрической энергии 9.

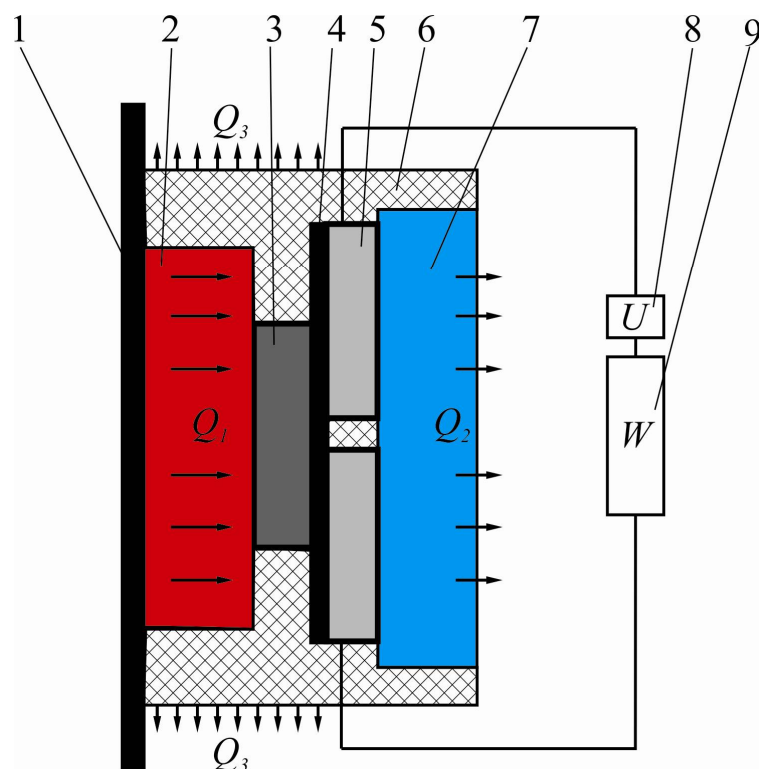


Рис. 1. Физическая модель блока термоэлектрического генератора:

1 – нагретая поверхность; 2 – горячий теплообменник; 3 – модуль высокотемпературного каскада ТЭГ; 4 – тепловыравнивающая пластина; 5 – модули низкотемпературного каскада ТЭГ; 6 – тепловая изоляция; 7 – холодный теплообменник; 8 – стабилизатор напряжения; 9 – аккумулятор электрической энергии.

Поскольку генератор установлен на нагретую поверхность, в модели не рассматриваются процессы теплопереноса от реального источника горения топлива к этой поверхности. Вместо этого, для определения температуры нагретой поверхности 1, используются экспериментальные зависимости ее температуры от времени при реальном цикле использования источника тепла на твердом топливе [2].

## Математическое и компьютерное описания модели

Таким образом, для расчетов термоэлектрического генератора в соответствии с физической моделью, приведенной на рис.1, использовано уравнение баланса теплот.

На горячей стороне размещен источник тепла переменной мощности  $Q_1[T_1(t)]$ . Его тепловая мощность зависит от температуры этой поверхности  $T_1$ , которая, в свою очередь, изменяется со временем  $t$  [3] и представляется в виде некоторой функции  $f[T_1(t)]$ .

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

Подвод тепла от нагретой поверхности к горячей стороне термоэлектрического модуля и отвод тепла к холодному теплообменнику описываются уравнениями:

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

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

где  $\chi_1, \chi_2$  – тепловые сопротивления горячего и холодного теплообменников;  $T_r, T_x$  – температуры горячей и холодной сторон термоэлектрического модуля, соответственно;  $T_2$  – температура внешней поверхности холодного теплообменника.

Тепловая мощность  $Q_2$  отводится от холодного теплообменника путем принудительной конвекции воздуха в окружающую среду:

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

где  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена между поверхностью теплообменника и окружающей средой;  $S_m$  – площадь поверхности теплообмена;  $T_0$  – температура окружающей среды.

Электрическая мощность, которая генерируется термоэлектрическим модулем, пропорциональна  $Q_1[T_1(t)]$  и его КПД  $\eta$ :

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

Основные потери тепла  $Q_3$  происходят через тепловую изоляцию:

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

где  $\chi_4$  – тепловое сопротивление изоляции,  $T_M$  – температура внутренней поверхности тепловой изоляции.

Таким образом, уравнение теплового баланса для избранной модели термоэлектрического генератора можно записать в виде:

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

Для компьютерного представления математической модели ТЭГ использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysics [6]. Для его использования необходимо представить наши уравнения в следующем виде.

Для описания потоков тепла и электричества воспользуемся законами сохранения энергии

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

и электрического заряда

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

где

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

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

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

Здесь  $\vec{E}$  – плотность потока энергии;  $\vec{q}$  – плотность теплового потока;  $\vec{j}$  – плотность электрического тока;  $U$  – электрический потенциал;  $T$  – температура;  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$  – коэффициенты термоЭДС, электропроводности и теплопроводности.

Учитывая (10) – (12), можно получить

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

Тогда законы сохранения (8), (9) приобретают вид:

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

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

Из решения уравнения (14) - (15) мы получим распределения физических полей, а также интегральные значения эффективности и мощности ТЭГ.

### Описание динамических мощностей ТЭГ

Для определения реальных температурных условий на нагретых поверхностях печей с пламенными источниками тепла на твердом топливе (дровах) проведены экспериментальные исследования и определены зависимости температур нагретых поверхностей печи от времени, на протяжении которого с равными интервалами происходило добавление одинакового количества дров [2].

Полученные данные после обработки с использованием регрессионного анализа представлены в виде функциональных зависимостей температур нагретых поверхностей печи от времени и использованы при расчетах характеристик термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла сменной мощности на твердом топливе.

Таким образом, с использованием компьютерных методов проведены расчеты динамических мощностей ТЭГ при условии его установки на поверхности печи (рис. 2).

На рис. 2 приведена зависимость мощности ТЭГ, размещенного на задней поверхности печи, от времени для температуры холодной стороны ТЭГ  $T_X = 30^\circ \text{C}$  (кривая 1 на рис. 2).

Температура горячей стороны ТЭГ описывается кривой 2 на рис. 2.

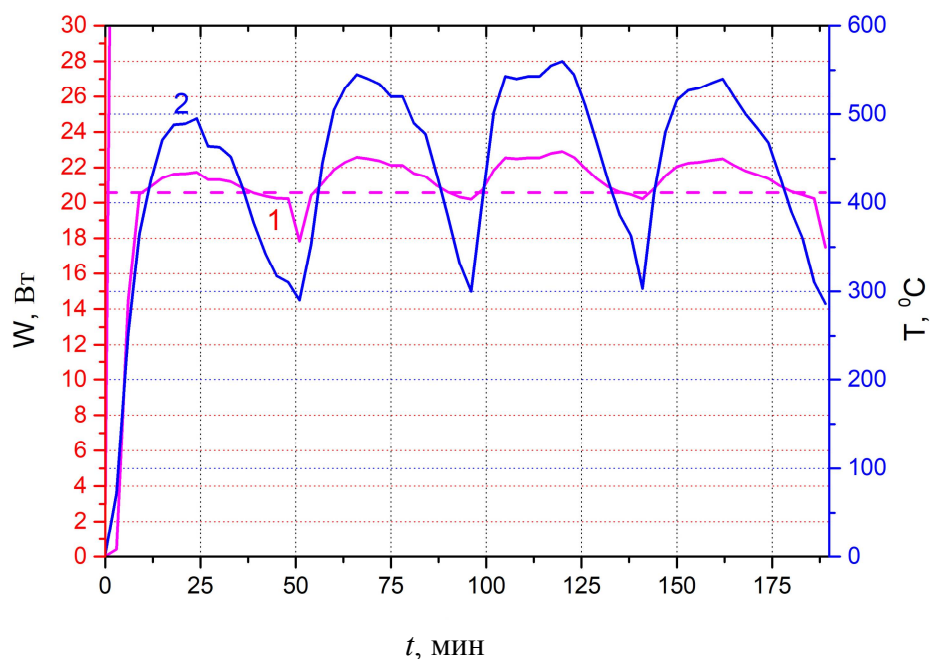


Рис. 2. Зависимость мощности ТЭГ размещенного на задней поверхности печи, от времени: 1 – мощность ТЭГ при  $T_X=30^\circ$ , 2 – температура поверхности печи.

Как видно из рис. 2, характер зависимости динамической мощности от времени хотя и соответствует временной зависимости температуры поверхности печи, эта зависимость от температуры является не столь резкой, как в однокаскадном варианте ТЭГ [3]. Для температуры холодной стороны  $T_X=30^\circ\text{C}$  усредненное значение мощности ТЭГ, который состоит из одного термоэлектрического модуля на высокотемпературном каскаде (из *Si-Ge*) и двух на низкотемпературном (из *Bi-Te*), за выбранный отрезок времени составляет 20.56 Вт. При этом энергия, генерируемая ТЭГ в течение 1 ч, составляет  $\sim 70$  кДж.

Итак, исследуемый вариант двухкаскадного ТЭГ из специализированных материалов на основе систем *Bi-Te* и *Si-Ge* позволяет повысить его удельную мощность на  $\sim 12.5\%$  по сравнению с однокаскадным вариантом [2].

## Выводы

1. На основе экспериментальных данных рассчитана динамическая мощность двухкаскадного ТЭГ с пламенными источниками тепла на твердом топливе, в котором используются термоэлементы на основе системы *Bi-Te* в низкотемпературном каскаде и системы *Si-Ge* – в высокотемпературном.
2. Усредненное значение мощности ТЭГ, состоящего из одного термоэлектрического модуля в высокотемпературном каскаде (из *Si-Ge*) и двух в низкотемпературном (из *Bi-Te*), в исследованном временном отрезке составляет 20.56 Вт (при температуре его холодной стороны  $T_X=30^\circ\text{C}$ ). При этом энергия, генерируемая ТЭГ в течение 1 ч, составляет  $\sim 70$  кДж.
3. Установлено, что исследуемый вариант двухкаскадного ТЭГ из специализированных материалов на основе систем *Bi-Te* и *Si-Ge* позволяет повысить его удельную мощность на  $\sim$

12.5 % по сравнению с однокаскадным вариантом.

## Литература

1. Анатычук Л.И., Мочернюк Р.М., Гаврилюк Н.В., Андрусак И.С. Термоэлектрический генератор, который использует тепло нагретых поверхностей // Термоэлектричество. – 2017. – №2. – С. 84 – 95.
2. Анатычук Л.И., Розвер Ю.Ю., Прибыла А.В., Максимук Н.В. Термоэлектрические генераторы с пламенными источниками тепла переменной мощности и стабилизаторами температуры термобатарей // Термоэлектричество. – 2018. – №2. – С. 22–29.
3. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Термоэлектрические генераторы с пламенными источниками тепла переменной мощности, однокаскадными термобатареями и аккумуляторами электрической энергии // Термоэлектричество. – 2018. – №3. – С. 46–54.
4. Михайловский В.Я. Термоэлектрические каскадные модули из материалов на основе  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS. / Михайловский В.Я., Билинский-Слотило В.Р. // Термоэлектричество. – 2012. – №4. – С. 67-74.
5. <http://www.ite.inst.cv.ua>.
6. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Поступила в редакцию 22.10.2018.

**Anatychuk L.I.,** *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*<sup>1,2</sup>  
**Prybyla A.V.,** *cand. Phys.- math. Sciences*<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

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

*This paper presents calculations of the dynamic power of a two-stage thermoelectric generator with flame heat sources of variable power. The results of calculations of such a generator with its stages made of materials based on Bi-Te and Si-Ge are given. Bibl. 6, Fig. 2.*

**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. Anatychuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V., Maksimuk M.V. (2018). Thermoelectric generators with flame heat sources of variable power and temperature stabilizers for thermopiles. *J. Thermoelectricity*, 2, P. 22–29.
3. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2018). Thermoelectric generators with flame heat sources of variable power, single-stage thermopiles and electric energy batteries. *J. Thermoelectricity*, 3, P. 46–54.
7. Mykhailovsky V.Ya., Bilinsky-Slotylo V.R. (2012). Thermoelectric staged modules of materials based on  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS. *J. Thermoelectricity*, 4, P. 67-74.
4. <http://www.ite.inst.cv.ua>.
5. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010). COMSOLAB, 804 p.

Submitted 22.10.2018.