

Анатычук Л.И., *акад. НАН Украины*^{1,2},
Максимук Н.В.¹,
Прибыла А.В., *канд. физ.-мат. наук*^{1,2},
Розвер Ю.Ю.¹

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 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. Библи. 8, рис. 5.

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

Введение

Общая характеристика проблемы. Для питания различной маломощной аппаратуры обычно используются химические источники тока. Однако, наряду с бесспорными преимуществами, их использование связано с определенными недостатками – наличием саморазряда, малым ресурсом работы, ограниченным сроком хранения и эксплуатации в условиях низких температур, а также проблемами их утилизации [1, 2].

Указанных недостатков лишены термоэлектрические генераторы (ТЭГ) с пламенными источниками тепла на твердом топливе, в частности на дровах и прессованных брикетах, которые широко используются для обогрева помещений и приготовления пищи, особенно в сельской местности и отдаленных районах [2, 3].

Серийное производство термоэлектрических генераторов с пламенными источниками тепла на твердом топливе осуществляется многими производителями, в частности российскими компаниями «Криотерм» и «Термофор» [4, 5] разработаны термоэлектрические печи электрической мощностью 25 - 50 Вт, предназначенные для освещения, питания маломощных бытовых приборов, зарядки аккумуляторов, а также отопления помещений площадью до 50 м² [4, 5]. Китайской компанией «Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd.» разработана серия термогенераторов мощностью 15 - 45 Вт [6]. Общим подходом при разработке таких термогенераторов является использование термоэлектрических модулей, изготовленных из

материалов на основе теллурида висмута с предельной «горячей» температурой 300 °С. Однако температура поверхностей твердотопливных источников тепла, на которые устанавливается ТЭГ, достигает и 600 °С и непрерывно изменяется во времени. Это приводит к уменьшению ресурса работы ТЭГ и, как следствие, к быстрому выходу генератора из строя. Для устранения этого в конструкции термогенератора предусмотрено наличие стабилизатора температуры горячей поверхности печи, «отсекающего» температуры, превышающие 300 °С. Понятно, что это приводит к уменьшению электрической мощности ТЭГ, поскольку он в этом случае использует не всю тепловую мощность печи.

Кроме того, как показывает анализ температуры, при проектировании ТЭГ используются физические модели с постоянной температурой источника тепла, что не соответствует реальной ситуации. Во время работы печи температура ее поверхности динамически изменяется, что отражается на выходной мощности ТЭГ.

Целью данной работы является разработка теории и методов проектирования термоэлектрического генератора с нестабильными источниками тепла переменной мощности, в частности на дровах.

Физическая модель

В расчетах использована физическая модель блока термоэлектрического генератора (рис. 1), включающая нагретую поверхность источника тепла переменной мощности 1, стабилизатор температуры, «отсекающий» температуры на горячей поверхности термоэлектрического генератора, превышающие 300 °С 2, теплообменники для подвода 3 и отвода 6 теплового потока к/от термоэлектрическому модулю 4, тепловую изоляцию 5, стабилизатор электрического напряжения 7 и аккумулятор электрической энергии 8.

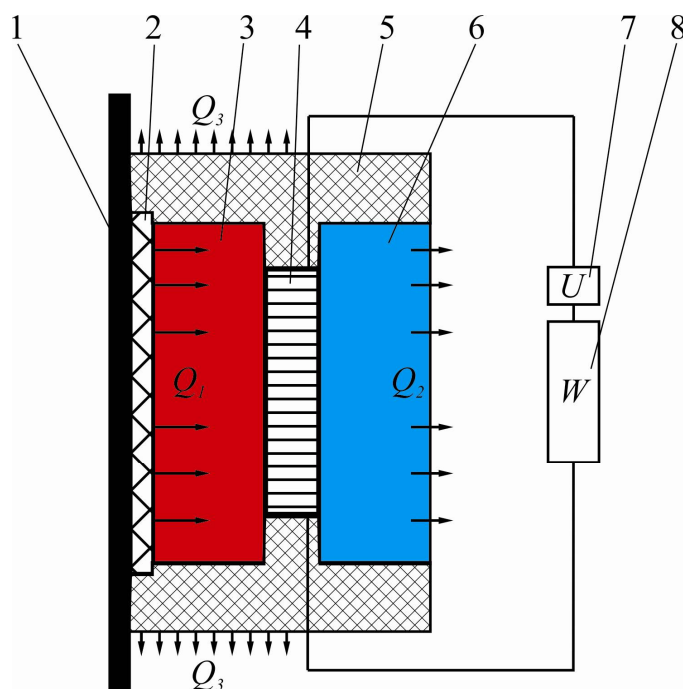


Рис. 1. Физическая модель блока термоэлектрического генератора:

- 1 – нагретая поверхность; 2 – стабилизатор температуры; 3 – горячий теплообменник;
4 – термоэлектрический модуль; 5 – теплоизоляция; 6 – холодный теплообменник;
7 – стабилизатор напряжения; 8 – 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 (рис. 3).

Математическое и компьютерное описание модели

Таким образом, для расчета термоэлектрического генератора в соответствии с физической моделью (рис. 1) использовано уравнение баланса теплот.

На горячей стороне размещен источник тепла переменной мощности $[T_1(t)]$. Его тепловая мощность зависит от температуры этой поверхности T_1 , которая, в свою очередь, изменяется в зависимости от времени t (рис. 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 описывается уравнениями:

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

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

где χ_1, χ_2 – тепловые сопротивления горячего и холодного теплообменников; T_G, T_X – температуры горячей и холодной стороны 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 α – 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 η :

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

Основные потери тепла Q_3 происходят через тепловую изоляцию:

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

где χ_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 описания математической модели ТЭГ использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysics [7]. Для этого соответствующие уравнения представляются так:

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 α , σ , κ – 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 системы уравнений (14) – (15) мы получим распределения физических полей, а также интегральные значения эффективности и мощности ТЭГ.

Экспериментальные исследования тепловых режимов источника тепла переменной мощности

Для определения реальных температурных условий на нагретых поверхностях печей с пламенными источниками тепла на твердом топливе (дровах) проведены экспериментальные исследования с использованием печи, изображенной на рис. 2.

В ходе эксперимента определены зависимости температур нагретых поверхностей печи от времени, в течение которого с равными интервалами происходило добавление одинакового количества дров. Общее время эксперимента составило 3.2 часа. Дрова в количестве 5 кг древесины породы «ива» добавлялись с интервалом времени 50 мин.

На рис. 3 приведены результаты измерений температуры горячих поверхностей печи. Кривые 1 и 2 на рис. 3 отвечают температурам боковых поверхностей печи, а кривая 3 – задней поверхности печи. I, II, III, IV – интервалы времени, в течение которых происходило добавление дров в печь.

Как видно из рис. 3, температура поверхностей печей циклически изменялась в соответствии с интервалами добавления дров. Причем, температуры боковых поверхностей (кривые 1 и 2 на рис. 3) не превышают 430 °С, а температура задней поверхности печи (кривая 3 на рис. 3) достигает значений ~ 600 °С.

Полученные данные обработаны и представлены в виде функциональных зависимостей температур нагретых поверхностей печи от времени, использованных в дальнейшем при расчетах характеристик термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла переменной мощности на твердом топливе.

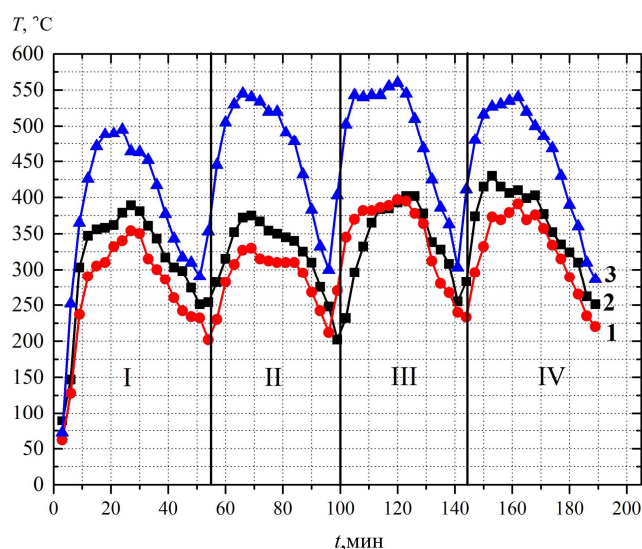


Рис. 3. Экспериментальные зависимости температуры нагретых поверхностей печи от времени: 1, 2 – температуры боковых поверхностей печи; 3 – температура задней поверхности печи.

Описание динамических мощностей ТЭГ

Таким образом, с использованием компьютерных методов проведен расчет динамических мощностей ТЭГ при условиях его установки на боковой и задней поверхностях печи (рис. 4, 5).

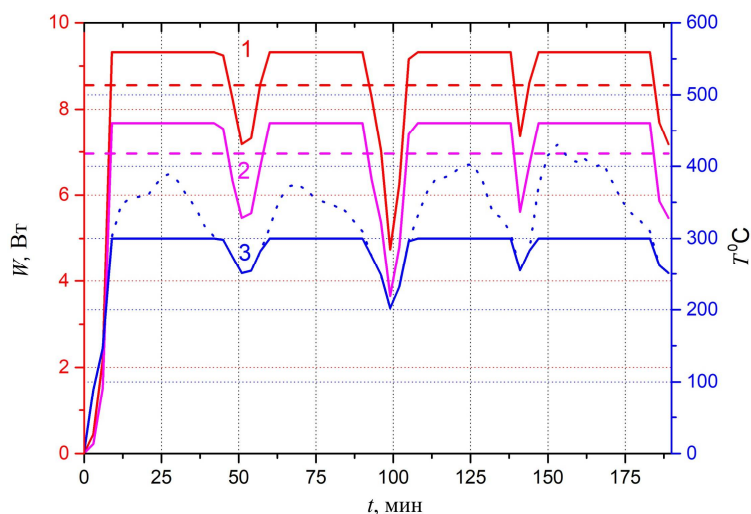


Рис. 4. Зависимость мощности ТЭГ, размещенного на боковой поверхности печи, от времени: 1 – мощность ТЭГ при $T_x = 30^\circ\text{C}$; 2 – мощность ТЭГ при $T_x = 50^\circ\text{C}$; 3 – температура поверхности печи.

В качестве термоэлектрических преобразователей для ТЭГ использован 1 термоэлектрический модуль АЛТЕК – 1061 из материала на основе теллурида висмута (Bi_2Te_3). Характеристики такого модуля приведены в [8]. Его предельная «горячая» температура составляет 300°C . Поэтому, в соответствии с физической моделью (рис. 1), между поверхностью горячей стенки и ТЭГ находится стабилизатор температуры, «отсекающий» температуры, превышающие 300°C .

На рис. 4 приведена зависимость мощности ТЭГ, размещенного на боковой поверхности печи, от времени для температур холодной стороны ТЭГ $T_x = 30^\circ\text{C}$ (1 на рис. 4) и $T_x = 50^\circ\text{C}$ (2 на рис. 4). Температура горячей стороны ТЭГ показана сплошной кривой 3 на рис. 4, а

температура боковой поверхности печи – пунктирной кривой на рис. 4.

Как видно из рис. 4, характер зависимости динамической мощности от времени в целом воспроизводит зависимости температуры поверхности печи. Для случая температур холодной стороны $T_X = 30^\circ\text{C}$ усредненное значение мощности ТЭГ, который состоит из одного термоэлектрического модуля, за выбранный отрезок времени составляет 8.6 Вт, а для $T_X = 50^\circ\text{C}$ – 7 Вт. При этом энергия, генерируемая ТЭГ в расчете на 1 час, составляет ~ 30 кДж для $T_X = 30^\circ\text{C}$ и ~ 25 кДж для $T_X = 50^\circ\text{C}$.

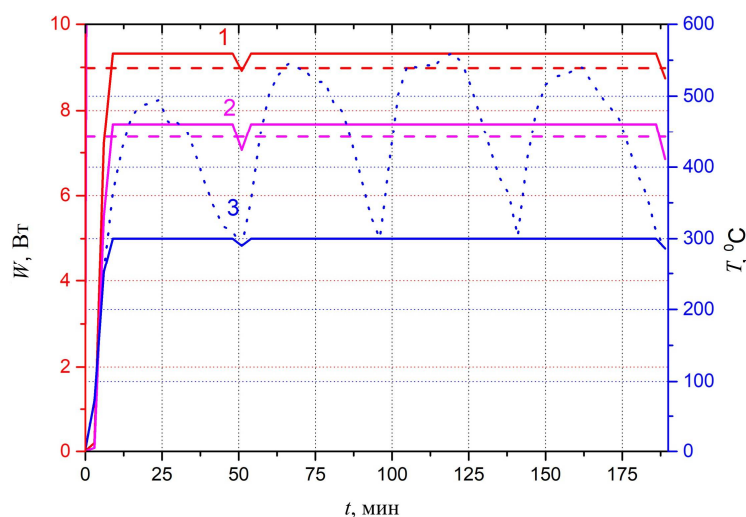


Рис. 5. Зависимость мощности ТЭГ, размещенного на задней поверхности печи, от времени:

1 – мощность ТЭГ при $T_X = 30^\circ\text{C}$, 2 – мощность ТЭГ при $T_X = 50^\circ\text{C}$;
3 – температура поверхности печи.

На рис. 5 приведена аналогичная зависимость мощности ТЭГ, размещенного на задней поверхности печи, от времени для температур холодной стороны ТЭГ $T_X = 30^\circ\text{C}$ (1 на рис. 5) и $T_X = 50^\circ\text{C}$ (2 на рис. 5). Температура горячей стороны ТЭГ показана сплошной кривой 3 на рис. 5, а температура задней поверхности печи – пунктирной кривой на рис. 5.

Как видно из рис. 5, характер зависимости динамической мощности от времени в целом воспроизводит зависимости температуры поверхности печи. Для случая температуры холодной стороны $T_X = 30^\circ\text{C}$ усредненное значение мощности ТЭГ, который состоит из одного термоэлектрического модуля, за выбранный отрезок времени составляет 9 Вт, а для $T_X = 50^\circ\text{C}$ – 7.4 Вт. При этом энергия, генерируемая ТЭГ в расчете на 1 ч, составляет ~ 32 кДж для $T_X = 30^\circ\text{C}$ и ~ 27 кДж для $T_X = 50^\circ\text{C}$.

Таким образом, невзирая на значительные отличия между температурами боковых и задней стенок печи, мощности ТЭГ для первого и второго случаев отличаются лишь на $\sim 5\%$, что связано с использованием стабилизатора температуры горячей стороны ТЭГ.

Однако из анализа кривых 3 на рис. 4 и 5, становится понятно, что такая принудительная стабилизация температуры поверхности печи ведет к значительным потерям в мощности ТЭГ. Эти потери можно оценить, ведь, как уже отмечалось, характер зависимости динамической мощности от времени в целом воспроизводит зависимость температуры поверхности печи. И если допустить, что мы будем использовать вместо стабилизированной температуры (сплошная синяя линия 3 на рис. 4 и 5) всю температуру поверхности печи (пунктирная синяя линия 3 на рис. 4 и 5), то выигрыш в исходной мощности ТЭГ будет составлять $\sim 30 - 40\%$.

Следовательно, для последующего улучшения качества термоэлектрических генераторов, использующих пламенные источники тепла переменной мощности на твердом топливе,

важными являются исследования, направленные на поиск возможностей использования полной тепловой мощности печей, в частности разработка ТЭГ из высокотемпературных материалов, а также использование каскадных генераторов, оптимизированных на необходимые интервалы температур.

Выводы

1. Определены экспериментальные зависимости динамической температуры горячих поверхностей печи для сжигания дров в режиме ее циклического использования.
2. На основе экспериментальных данных рассчитана динамическая мощность ТЭГ с пламенными источниками тепла на твердом топливе со стабилизаторами температуры термобатарей. Усредненное значение мощности ТЭГ, состоящего из одного термоэлектрического модуля, установленного на задней поверхности печи, на заданном временном отрезке составляет 9 Вт (при температуре его холодной стороны $T_x = 30^\circ\text{C}$).
3. Установлено, что принудительная стабилизация температуры поверхности печи ведет к значительным потерям в мощности ТЭГ, которые достигают $\sim 30 - 40\%$.
4. Указаны возможности улучшения качества термоэлектрических генераторов, которые используют пламенные источники тепла переменной мощности на твердом топливе, в частности за счет разработки ТЭГ из высокотемпературных материалов, а также использования каскадных генераторов, оптимизированных на необходимые интервалы температур.

Литература

1. Бубнов Ю.И., Орлов С.Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации. Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ. 2005.
2. Анатычук Л.И., Мочернюк Р.М., Гаврилюк Н.В., Андрусак И.С. Термоэлектрический генератор, использующий тепло нагретых поверхностей // Термоэлектричество. – 2017. №2. – С 84 - 95.
3. Вихор Л.Н., Максимук Н.В. Проектирование термоэлектрических каскадных модулей для ТЭГ на твердом топливе // Термоэлектричество. – 2017. - №4. – С. 40 - 48.
4. Энергопечь [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.energopetch.ru>.
5. KRYOTHERM [Электронный ресурс] - Режим доступа к ресурсу: <http://kryothermtec.com/ru>.
6. Thermonamic electronic (Jiangxi) Corp. Ltd. [Электронный ресурс] - Режим доступа к ресурсу: <http://www.thermonamic.com>.
7. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
8. ИТЭ [Электронный ресурс] - Режим доступа к ресурсу: <http://www.ite.inst.cv.ua>

Поступила в редакцию 30.04.2018

Anatychuk 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, 58012, Ukraine,
e-mail: anatyuch@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 kmicheskiie istochniki toka: *Elementy i akkumulyatory. Oborudovaniie dlia ispytaniy i ekspluatatsii. [Sealed chemical sources of current: Elements and batteries. Testing and operating equipment]*. Saint-Petersburgr: Khimizdat [in Russian].
2. Anatyuchuk L.I., Mocherniuk R.M., Havryliuk M.V., Andrusiak I.S. (2017). Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces. *J.Thermoelectricity*, 2, C 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