

К. х. н. В. Я. МИХАЙЛОВСКИЙ, Ю. И. ФЕДИНЧУК

Дата поступления в редакцию  
30.12.2004 г.

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества  
E-mail: ite@inst.cv.ua

Оппонент д. ф.-м. н. Н. Д. РАРАНСКИЙ  
(ЧНУ им. Юрия Федыковича, г. Черновцы)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРАХ

*Обоснованный выбор величины коэффициента конвективного теплообмена позволяет оптимизировать системы подвода и отвода тепла и, как следствие, повысить КПД генератора в целом.*

Нормальное функционирование различной электронной аппаратуры в значительной степени определяется стабильностью параметров источника электрической энергии и тепловых режимов электронных устройств, что особенно важно в условиях автономного их использования при пониженных температурах. Для таких случаев весьма перспективными являются термоэлектрические генераторы (ТЭГ) на органическом топливе [1—3]. ТЭГ имеют длительный ресурс работы, надежны, а также позволяют получать одновременно электрическую энергию для питания электронного устройства и тепловую энергию для создания необходимого теплового режима устройства в целом. Области применения термогенераторов для питания различных электронных устройств, в которых они имеют преимущества перед другими источниками электрической энергии, приведены в таблице [4].

В качестве источников тепла для термоэлектрических генераторов используют пламенные или каталитические горелки. Каждый из таких источников тепла имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать в конкретных условиях применения ТЭГ. С точки зрения автономности и надежности термоэлектрического генератора более перспективными являются каталитические горелки, в которых реализована схема встречной подачи топлива и воздуха на катализатор.

Физическая модель каталитического ТЭГ со встречной подачей реагентов и распределение тепловых потоков в нем приведено на рис. 1.

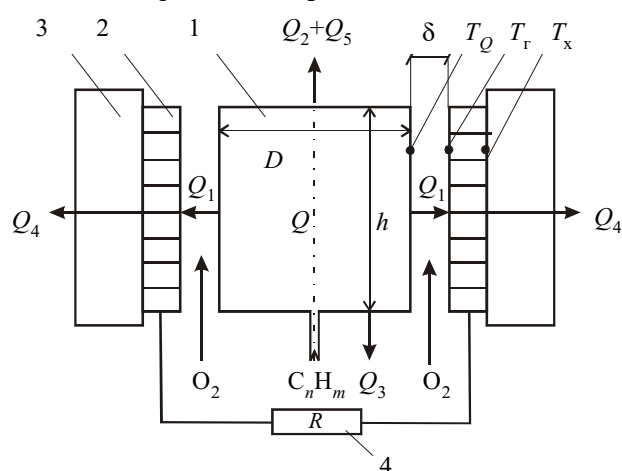
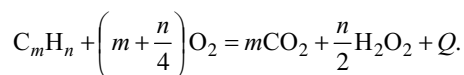


Рис. 1. Физическая модель каталитического ТЭГ со встречной подачей реагентов:  
1 — каталитический источник тепла; 2 — термобатарея; 3 — холодный теплообменник; 4 — внешняя нагрузка

На схеме  $T_0$ ,  $T_g$ ,  $T_x$  — значения температуры источника тепла, горячего и холодного спаев термобатареи (ТЭБ), соответственно.

Источником тепла в ТЭГ является химическая реакция окисления углеводородного топлива на катализаторе, в результате чего выделяется некоторое количество тепла  $Q$ :



### Области использования термоэлектрических генераторов

Промышленность	Катодная защита, автономная охрана и сигнализация, телеметрический контроль параметров нефте- и газопроводов, резервные и аварийные источники питания технологических процессов
Связь	Радиорелейные станции, ретрансляция, радиотелефон в автономных условиях, резервное питание ЭВМ, информационные табло
Транспорт	Аварийная путевая сигнализация, зарядка аккумуляторных батарей, системы подогрева салона и двигателя автомобиля
Океанология	Буи, маяки, сейсмическое оборудование
Метеорология	Автономные метеостанции, приборы сбора и контроля данных
Геологическая разведка	Автономные источники питания радиостанций, полевых лабораторий, сигнальных устройств
Наука	Обеспечение автономности контрольно-измерительных приборов
Быт	Электро- и теплообеспечение квартир, дач, гаражей, кемпингов, автономное и резервное питание теле- и радиоаппаратуры, электроприборов, средств малой механизации

Тепло, которое передается от источника тепла к ТЭБ излучением и конвекцией, обозначено на схеме как  $Q_1$ . Потери тепла с верхнего торца горелки состоят из тепловых потерь за счет излучения и конвекции ( $Q_2$ ) и потерь тепла, обусловленных отводом в окружающую среду горячих продуктов реакции ( $Q_3$ ). Потери тепла с нижнего торца горелки обозначены как  $Q_4$ . Тепло, которое отводится от термоэлектрического преобразователя холодным радиатором, обозначено как  $Q_4$ .

Для представленной модели ТЭГ теплопередача конвекцией — один из основных путей переноса тепла.

Основной трудностью при расчете количества тепла, передаваемого конвекцией, является определение коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha$ , поэтому очень важным является детальное его исследование в системах подвода и отвода тепла от термобатарей.

Обоснованный выбор величины коэффициента конвективного теплообмена для реальной конструкции ТЭГ позволит определить основные пути оптимизации систем подвода и отвода тепла и, как следствие, приведет к повышению КПД генератора в целом.

Цель данной работы — определение величины коэффициентов конвективного теплообмена в каталитическом термоэлектрическом генераторе со встречной подачей реагентов и выявление зависимостей  $\alpha$  от физических и геометрических характеристик ТЭГ.

Известно, что перенос тепла конвекцией осуществляется в результате смешивания в пространстве неравномерно нагретых объемов газа. В соответствии с законом Ньютона–Рихмана тепловой поток пропорционален площади поверхности теплообмена ( $F$ ) и разности температур поверхности ( $T_1$ ) и газа ( $T_2$ ) [5, с. 152]:

$$dQ = \alpha(T_1 - T_2)dF. \quad (1)$$

Как известно, коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha$  зависит от физических свойств теплоотдающей поверхности, ее формы и размеров, от физических свойств газа — плотности, вязкости, теплоемкости, теплопроводности, а также от скорости и природы возникновения его движения.

Исходя из (1), плотность теплового потока

$$q = \alpha(T_1 - T_2).$$

С другой стороны, если учесть, что при конвективном теплообмене тепло переносится не только конвекцией, но и теплопроводностью [6, с. 207], то

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0},$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  
 $y$  — текущая координата.

Тогда в общем виде для коэффициента конвективного теплообмена можно записать:

$$\alpha = \frac{\lambda}{T_1 - T_2} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}. \quad (2)$$

Для определения коэффициента конвективного теплообмена при переносе тепла от каталитической горелки к теплоприемной поверхности ТЭБ ( $\lambda_1$ ) предложена следующая модель [8]:

1. Тепло переносится свободной конвекцией при турбулентном режиме движения газа.

2. Теплообмен осуществляется в ограниченном пространстве (щели), которое создается поверхностью катализатора и теплоприемной поверхностью ТЭБ. (Такую систему можно представить как две плоские вертикальные пластины или два коаксиально размещенных полых цилиндра, между которыми имеется узкая щель.)

3. Отношение высоты щели ( $h$ ) к ее ширине ( $\delta$ ) удовлетворяет условию  $h/\delta > 5$ .

Из-за ограниченности пространства условия свободного движения газа в щели существенно отличаются от свободного движения в неограниченном пространстве. В таком случае средняя плотность теплового потока рассчитывается подобно теплопроводности [5], а коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha$  определяется через эквивалентный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{эф}$  и учитывает перенос тепла в щели конвекцией и теплопроводностью.

Тепловой поток в щели

$$q = \frac{\lambda_{эф}}{\delta} (T_Q - T_r), \quad (3)$$

где  $\lambda_{эф} = \epsilon_k \lambda$ ;  
 $\epsilon_k$  — коэффициент, который зависит от интенсивности свободной конвекции и определяется из выражения, полученного на основе экспериментальных данных;  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности газа.

При конвективном теплообмене в щели для газовой среды  $PrGr > 10^3$ , и  $\epsilon_k$  определяется по формуле [5, с. 164]

$$\epsilon_k = 0,18(PrGr)^{0,25}, \quad (4)$$

где  $Pr = \nu/a$  — число Прандтля;  
 $Gr = g\beta\delta^3\bar{T}/\nu^2$  — число Грасгофа;  
 $g$  — ускорение силы тяжести;  
 $\beta$  — коэффициент объемного расширения;  
 $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости;  
 $a$  — коэффициент температуропроводности.

В качестве определяющей температуры в выражении для числа Грасгофа взята средняя температура газа  $\bar{T} = 0,5(T_Q + T_r)$ .

Таким образом, получаем  $\lambda_{эф} \sim \bar{T}^{0,25}$ . Учитывая, что  $\alpha_1$  определяется через  $\lambda_{эф}$ , можем записать выражение для определения коэффициента конвективного теплообмена при переносе тепла от каталитического источника к теплоприемной поверхности ТЭБ:

$$\alpha_1 = 0,18\lambda \left( \frac{g\beta\delta^3}{a\nu} \right)^{0,25} \left( \frac{T_Q + T_r}{2} \right)^{0,25}. \quad (5)$$

Следует отметить, что газовая среда, в которой происходит перенос тепла от каталитической горелки к ТЭБ, состоит из азота воздуха и продуктов окисления углеводородов (углекислый газ и водяной пар). Это нужно учитывать при расчете коэффициента конвективного теплообмена, т. е.

— при окислении метана

$$\alpha_1 = 0,709\alpha_1^{N_2} + 0,093\alpha_1^{CO_2} + 0,197\alpha_1^{H_2O}; \quad (6a)$$

— при окислении пропана

$$\alpha_1 = 0,74\alpha_1^{N_2} + 0,11\alpha_1^{CO_2} + 0,16\alpha_1^{H_2O}; \quad (6б)$$

— при окислении бутана

$$\alpha_1 = 0,726\alpha_1^{N_2} + 0,112\alpha_1^{CO_2} + 0,156\alpha_1^{H_2O}. \quad (6в)$$

Здесь  $\alpha_1^{N_2}$ ,  $\alpha_1^{CO_2}$  и  $\alpha_1^{H_2O}$  — значения коэффициентов конвективного теплообмена, рассчитанные по формуле (5), для азота, углекислого газа и водяного пара, соответственно.

Из полученных выражений можно для разных газов сред получить температурные зависимости коэффициента конвективного теплообмена для щелей различных размеров, что позволит определить оптимальный размер щели для каждого конкретного варианта генератора с раздельной подачей реагентов на катализатор. Размеры щели должны быть такими, чтобы, с одной стороны, реализовать близкую к максимальной теплопередачу от горелки к теплоприемной поверхности ТЭБ, а с другой — обеспечить поступление в щель необходимого количества воздуха для полного окисления топлива.

На рис. 2 приведены зависимости  $\alpha_1(T)$  для случая сгорания пропан-бутановой смеси.

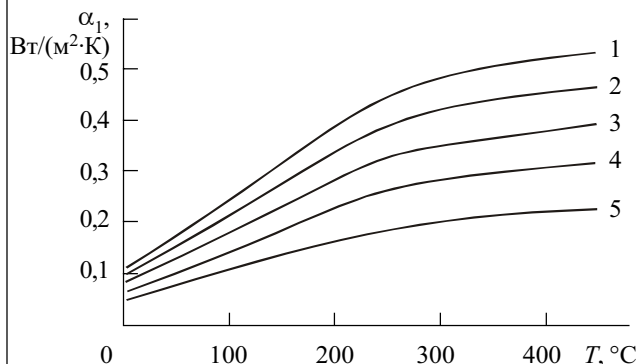


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента конвективного теплообмена для щелей различных размеров: 1 —  $h=2$  см,  $\delta=0,3$  см; 2 —  $h=10$  см,  $\delta=0,6$  см; 3 —  $h=18$  см,  $\delta=0,8$  см; 4 —  $h=20$  см,  $\delta=1$  см; 5 —  $h=25$  см,  $\delta=1,2$  см

С верхнего торца горелки тепло отводится излучением и конвекцией (рис. 1). В данной работе рассматривается та часть тепла, которая отводится за счет конвекции.

Для определения коэффициентов конвективного теплообмена для расчета потерь тепла с верхнего и нижнего торцов горелки ( $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ) воспользуемся тем, что  $Nu = \alpha l_0 / \lambda$ , где  $l_0$  — определяющий размер поверхности, омываемой газом.

Верхний и нижний торцы горелки можно представить в виде горизонтальных пластин, которые омываются воздухом. В таком случае должно выполняться следующее условие:  $10^3 < PrGr < 10^9$  [6, с. 226]. Определяющей температурой является температура окружающей среды  $T_0$ , а определяющим размером — диаметр горелки  $D$ .

Число Нуссельта находится следующим образом [5, с. 163]:

$$Nu = 0,54(PrGr)^{0,25}. \quad (7)$$

В таком случае

$$\alpha = 0,54\lambda \left( \frac{g\beta}{a n D} \right)^{0,25} T_0^{0,25}. \quad (8)$$

Согласно [5, с. 163], при конвективном теплообмене с горизонтальной пластины, если ее теплоотдающая поверхность повернута вверх, рассчитанный коэффициент конвективного теплообмена (8) увеличивается на 30%, т. е.

$$\alpha_2 = 0,702\lambda \left( \frac{g\beta}{a n D} \right)^{0,25} T_0^{0,25}. \quad (9)$$

В случае, когда теплоотдающая поверхность повернута вниз, значение  $\alpha$ , полученное из (8), нужно уменьшить на 30%:

$$\alpha_3 = 0,38\lambda \left( \frac{g\beta}{a n D} \right)^{0,25} T_0^{0,25}. \quad (10)$$

Зависимости коэффициента конвективного теплообмена от температуры при конвективном отводе тепла от торцов цилиндрической горелки представлены на рис. 3.

Тепло от термоэлектрического преобразователя отводится воздушным теплообменником при естественной конвекции воздуха. Такую систему теплоотвода можно представить в виде вертикальной пластины, размещенной в неограниченном пространстве, которая омывается воздухом. Тепло переносится при турбулентном режиме движения, поэтому  $PrGr > 10^9$  [6].

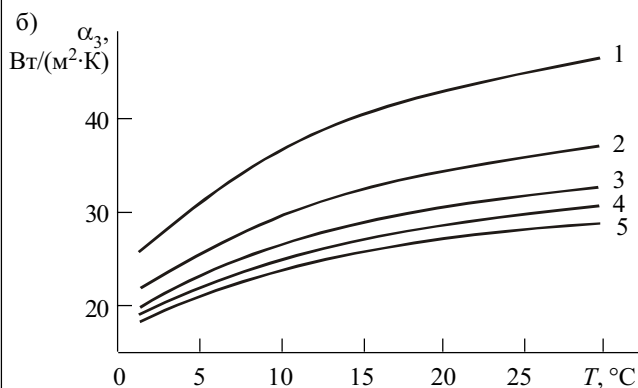
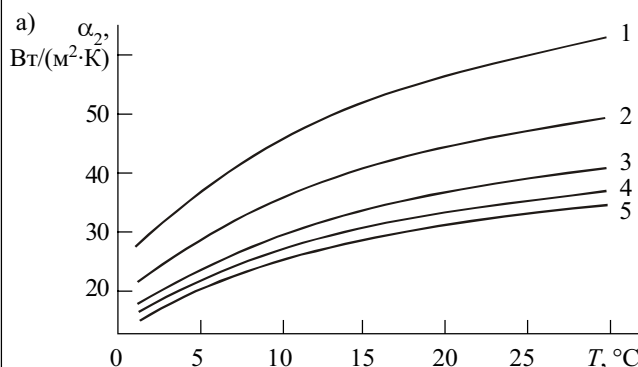


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента конвективного теплообмена при отводе тепла с верхнего (а) и нижнего (б) торцов горелки различного диаметра: 1 — 1 см; 2 — 5 см; 3 — 10 см; 4 — 15 см; 5 — 20 см

Для расчета коэффициента конвективного теплообмена для системы отвода тепла от термоэлектрического преобразователя ( $\alpha_4$ ) использована экспериментальная зависимость [8, с. 27]

$$Nu=0,135(PrGr)^{1/3}. \quad (11)$$

Число Грасгофа определяется по средней температуре пограничного слоя газа. В данном случае  $\bar{T} = 0,5(T_x + T_0)$ .

Используя выражения для определения чисел Pr, Gr и Nu, получим коэффициент конвективного теплообмена для системы отвода тепла от ТЭБ:

$$\alpha_4 = 0,135\lambda \left( \frac{g\beta}{aH} \right)^{1/3} \left( \frac{T_x + T_0}{2} \right)^{1/3}. \quad (12)$$

Если отвод тепла от термоэлектрического преобразователя осуществляется не естественной конвекцией, а принудительной, то выражение (12) существенно изменится.

Интенсивность теплообмена при вынужденном движении воздуха вдоль вертикальной пластины определяется критерием Рейнольдса (Re). В данном случае  $Re > 10^4$  [5], а  $Nu = 0,37Re^{0,8}Pr^{0,43}$ .

Выражение для коэффициента конвективного теплообмена в случае принудительной конвекции имеет вид

$$\alpha_4^n = 0,037\lambda \left( \frac{\omega h}{\nu} \right)^{0,8} \left( \frac{\nu}{a} \right)^{0,43} \frac{\lambda}{h}, \quad (13)$$

где  $\omega$  — скорость движения воздуха.

В каталитическом генераторе с совместной подачей реагентов передача большей части тепла от каталитической горелки к термоэлектрическому преобразователю осуществляется преимущественно теплопроводностью. Это обусловлено отсутствием щели между катализатором и теплоприемной поверхностью ТЭГ. В этом случае термобатарея имеет непосредствен-

ный тепловой контакт с теплоотдающей поверхностью катализатора, т. е. коэффициент  $\alpha_1$  теряет смысл.

Остальные тепловые потоки аналогичны тем, что рассматривались для ТЭГ со встречной подачей реагентов.

\*\*\*

Таким образом, получена возможность оптимизации систем подвода и отвода тепла реальной конструкции термоэлектрического генератора и, как следствие, повышения его КПД в целом.

Выделяемое генератором тепло можно использовать для создания необходимого теплового режима электронных устройств в условиях работы при пониженных температурах окружающей среды.

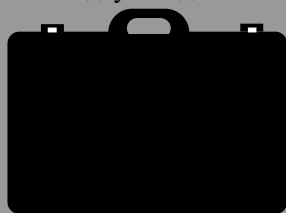
#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Михайловский В. Я. Особенности рекуперации тепла в термоэлектрических генераторах с каталитическим источником тепла // Термоэлектричество.— 2001.— № 4.— С. 74—80.
2. Михайловський В. Я. Системи запуску термоелектричних генераторів з каталітичним джерелом тепла // Термоелектрика.— 2000.— № 1.— С. 69—76.
3. Pustovalov A. A., Gusev V. V., Pubkin N. N., Nebera L. P. Catalytic thermoelectric generators operating on gas fuel // J. of Thermoelectricity.— 1994.— № 2.— Р. 90—96.
4. Михайловський В. Я. Каталітичні генератори тепла та електрики — шляхи оптимального використання енергії вуглеводневого палива // Термоелектрика.— 2001.— № 2.— С. 3—12.
5. Швец И. Т., Толубинский В. И., Алабовский А. Н. Теплотехника.— М.: Высшая школа, 1976.
6. Теоретические основы теплотехники. Справочник / Под ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина.— М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. Исаченко В. П., Осипова А. С., Суконец А. С. Теплопередача.— М.: Энергия, 1969.
8. Михайловский В. Я., Поперечный А. В. Теоретические предпосылки оптимизации микротермогенератора с каталитическим источником тепла // Термоэлектричество.— 2000.— № 4.— С. 23—31.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Экспериментальные исследования датчика давления с пневмомеханическим резонатором. (Украина, г. Киев)
- Погрешность градуировки термодиодных сенсоров. (Украина, г. Киев)
- Криоэлектронный преобразователь импульсов. (Россия, г. Йошкар-Ола)
- Новое поколение пьезокерамических датчиков физических величин. (Украина, г. Черкассы)
- Активное термостатирование полупроводниковых СВЧ-генераторов. (Украина, г. Днепропетровск)
- Применение феррогранатовых эпитаксиальных структур в сверхвысокочастотной электронике. (Украина, г. Львов)
- Исследование термоупругих свойств ТЭМ Пельтье. (Украина, г. Черновцы)
- Технология получения мощных диодов Шоттки на основе силицида палладия. (Беларусь, г. Минск)
- Моделирование температурного поля в кристалле иттрий-алюминиевого граната, выращиваемого двухстадийным методом Чохральского. (Украина, г. Харьков)



- Моделирование термоэлектрической системы генерирования тепловой и электрической энергии. (Украина, г. Черновцы)
- Особенности формирования твердотельной структуры МОП-транзисторов. (Беларусь, г. Минск)
- Тепловая эффективность поверхностей с пластинчато-просечным оребрением в условиях низкоскоростного обдува. (Украина, г. Киев)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции