

К. х. н. Л. Т. СТРУТИНСКАЯ

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества
E-mail: anatyach@inst.cv.uaДата поступления в редакцию
05.11 2007 г.Оппонент к. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МИКРОГЕНЕРАТОРА С КАТАЛИТИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА НА ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ

В работе представлены результаты исследований микрогенератора с каталитическим источником тепла на газовом топливе. Предложена модель микрогенератора со встречной подачей реагентов на катализатор.

В связи с интенсивным развитием микроэнергетики и ростом потребности в портативных электронных устройствах для систем телеметрии, навигации, метеорологических станций и маяков, работающих продолжительное время в автономном режиме, возникает необходимость поиска компактных и дешевых источников питания с высокой удельной энергией и продолжительным ресурсом работы. Термоэлектрические источники могут рассматриваться как альтернатива химическим источникам тока.

Процесс сгорания органического топлива в микрогенераторах зависит от их энергетических и температурных характеристик, а также от кинетических и газодинамических условий стабильного горения топлива. Потери тепла в микроисточниках приводят к уменьшению КПД термогенератора и требуют использования эффективных методов для снижения тепловых потерь. Сложность задачи обуславливает актуальность применения компьютерного моделирования при разработке новых термоэлектрических микроустройств с каталитическими источниками тепла, превращающих энергию органического топлива в электрическую энергию.

В общем виде для расчета термоэлектрических генераторов (ТЭГ) применяют численные методы (например, методы последовательных приближений, средних параметров) с использованием компьютерных программ, которые позволяют решать задачи оптимального управления термоэлектрическими процессами [1], рассчитывать ряд конструкций ТЭГ [2] и определять рациональные режимы их работы [3]. Численное моделирование плоского термоэлектрического микрогенератора [4] выполнено методом конечных объемов с целью прогнозирования оптимальных параметров термоэлектрического устройства на основе Si-Ge и Bi_2Te_3 и расчета процессов электро- и теплопереноса при линейном приближении.

Моделирование каталитической реакции в трубках реактора небольшого диаметра [5] и определе-

ние границ затухания для двумерной модели микроисточника с повторной циркуляцией тепла проведено авторами работы [6] при условии совместной подачи топлива и воздуха на катализатор. Результаты моделирования таких микрогенераторов не всегда согласуются с экспериментальными данными из-за того, что не учитываются все тепловые потери с поверхности источника тепла.

Использование каталитических диффузионных источников тепла в составе микрогенераторов позволяет решить ряд проблем тепловой регуляции, автономной и надежной работы генератора в широком диапазоне расхода топлива [7]. Однако результаты исследований таких генераторов в литературе практически не отражены.

Целью данной работы является моделирование термоэлектрического микрогенератора с каталитическим диффузионным источником тепла с учетом его энергетических, температурных и конструктивных параметров для повышения эффективности преобразования тепловой энергии в электрическую.

Физическая модель термоэлектрического микрогенератора с каталитическим источником тепла

Основная задача на начальной стадии проектирования термогенератора состоит в решении уравнения энергетического баланса и определении исходных параметров ТЭГ с учетом термоэлектрических свойств полупроводникового материала, использованного в термоэлектрической батарее (ТЭБ), и температурных ограничений для деталей конструкции устройства.

Для построения физической модели микрогенератора необходимо определить количество тепла, подводимого и отводимого от ТЭБ, и рабочие температуры каталитического источника тепла на газовом топливе. В данной работе расчет проведен для источника диаметром 10 мм и высотой 13 мм (объем катализатора 1 см^3), при этом учтены потери тепла с торцов каталитического источника тепла конвекцией и излучением, теплообмен каталитического источника тепла с термопреобразователем и потери тепла с продуктами сгорания.

Традиционно в каталитических микрокамерах сгорания используют совместную подачу топлива и воздуха на катализатор. Основные ее недостатки — необходимость использования дополнительных ус-

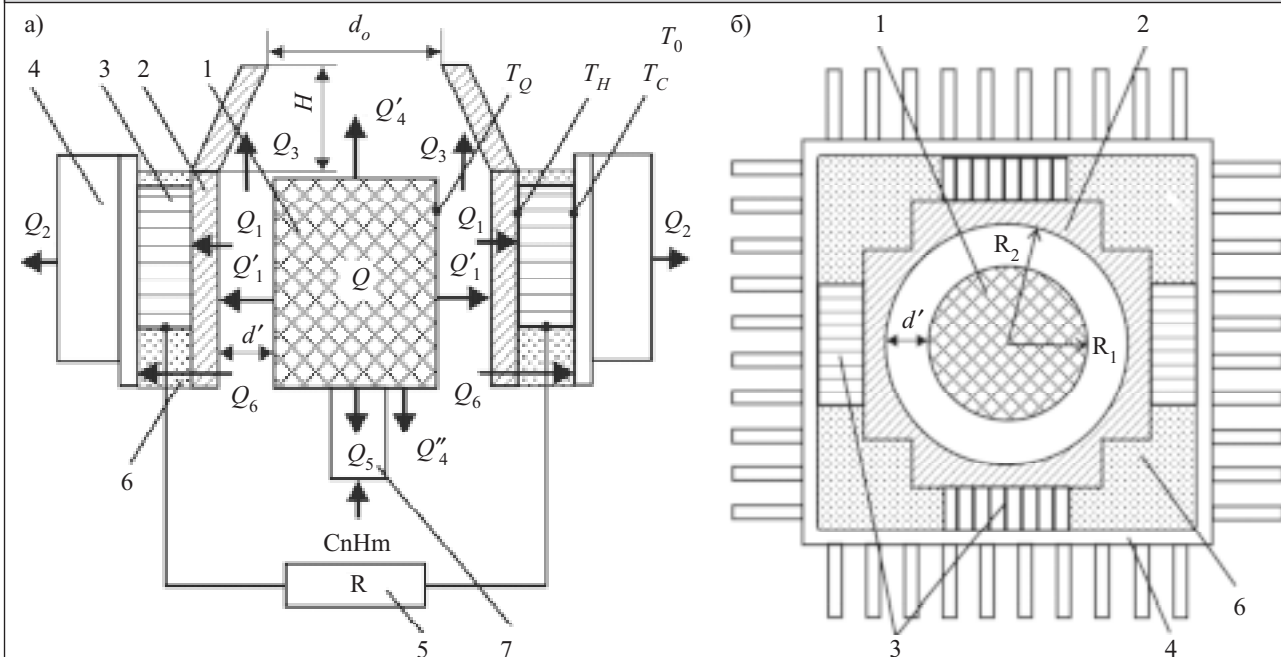


Рис. 1. Физическая модель термоэлектрического микрогенератора (а — вертикальное сечение, б — горизонтальное сечение):

1 — каталитический источник тепла; 2 — горячий радиатор; 3 — термоэлектрическая батарея; 4 — холодный радиатор; 5 — внешняя нагрузка; 6 — тепловая изоляция; 7 — газоподводящая трубка

тройств для подготовки топливно-воздушной смеси, жесткие требования к соблюдению ее стехиометрии, нестабильность процесса горения при отклонении от стехиометрического состава этой смеси. Диффузионные каталитические источники тепла с встречной подачей топлива и воздуха на катализатор лишены этих недостатков. В таких источниках тепла топливо поступает на катализатор под давлением, воздух — с противоположной стороны путем естественной диффузии. Эти источники надежны, обеспечивают автономную работу в широком диапазоне расхода топлива, а также при нарушении стехиометрического соотношения топливо/воздух.

Физическая модель микрогенератора с каталитическим источником тепла приведена на рис. 1.

Генератор содержит каталитический источник тепла 1 цилиндрической формы и термобатарею 3 из материала на основе Bi_2Te_3 . Отвод тепла от холодных спаев ТЭБ осуществляется радиатором 4 за счет естественной конвекции воздуха. На рис. 1 T_H — температура горячего спае ТЭБ; T_C — температура холодного спае ТЭБ; T_Q — температура поверхности источника тепла; T_0 — температура окружающей среды.

Построение физической модели микрогенератора проводилось путем согласования системы теплообмена, конструктивных характеристик, скорости химической реакции окисления топлива и свойств термоэлектрических батарей с учетом температурной зависимости термоэлектрических свойств материала ТЭБ. Температура спаев всех термоэлементов ТЭБ на горячей стороне принята одинаковой, поскольку малые размеры ТЭГ обуславливают незначительные изменения теплового потока вдоль теплосовместных поверхностей. Это допущение приня-

то и для спаев холодной стороны. Исследование модели генератора и расчет его характеристик проводили компьютерными методами.

Система уравнений теплового баланса такого термоэлектрического микрогенератора с учетом скорости реакции, которая протекает на поверхности катализатора, и полноты окисления топлива имеет следующий вид:

$$Q = Q'_1 + Q_3 + Q'_4 + Q''_4 + Q_5, \quad (1)$$

$$Q_1 = Q'_1 - Q_6, \quad (2)$$

$$Q_1 = P + Q_2, \quad (3)$$

$$Q = \frac{a(T_Q - T_H)S_k}{w}, \quad (4)$$

$$Q = a'(T'_Q - T_g)S_c, \quad (5)$$

$$Q = g_f \left[(c_2(T'_Q - 100) + \lambda' + c_3(100 - T_0))m_2 + (m_1c_1 + m_0c_0)(T'_Q - T_0) \right], \quad (6)$$

где Q — общая тепловая мощность источника тепла, которая определяется полнотой окисления топлива на катализаторе и скоростью реакции;

Q'_1 — тепло, которое передается от источника тепла горячему радиатору конвекцией и излучением;

Q_1 — полезное тепло (тепло, которое поступает к ТЭБ);

Q_2 — тепло, отводимое с помощью холодного радиатора в окружающую среду;

Q_3 — потери тепла с продуктами реакции;

Q'_4, Q''_4 — потери тепла с боковых поверхностей катализатора конвекцией и излучением;

Q_5 — потери тепла на элементах конструкции источника тепла;

Q_6 — потери тепла с поверхности элементов конструкции микрогенератора через тепловую изоляцию;
 P — электрическая мощность, генерируемая ТЭБ;
 a — коэффициент конвективного теплообмена в промежутке между источником тепла и горячим радиатором;
 w — скорость реакции горения топлива;
 a' — коэффициент конвективного теплообмена поверхности катализатора с газовым потоком;
 S_c — площадь поверхности катализатора, на которой происходит химическая реакция;
 S_k — площадь теплоотдающей боковой поверхности каталитического источника тепла;
 T_g — температура газового потока в каналах катализатора;
 T'_Q — температура в объеме катализатора;
 g_f — расход топлива;
 c_0, c_1, c_2, c_3 — соответственно теплоемкость воздуха, CO_2 , водяного пара, воды;
 λ' — удельная теплота парообразования воды;
 m_1, m_2 — коэффициенты, определяющие соответственно массовые доли CO_2 и H_2O , которые образуются при сгорании единицы массы топлива;
 m_0 — коэффициент для определения массы воздуха.

Величина Q'_1 определяется формулой [8]:

$$Q'_1 = a(T_Q - T_H)S_r + \epsilon'\sigma_0[T_Q^4 - T_H^4]S_k, \quad (7)$$

$$\epsilon' = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{S_k}{S_r} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}, \quad (8)$$

где S_r — площадь поверхности горячего радиатора;

σ_0 — постоянная Стефана-Больцмана;

ϵ' — приведенная степень черноты для случая, когда горячий радиатор полностью охватывает каталитический источник тепла [8];

ϵ_1, ϵ_2 — степень черноты поверхности каталитического источника тепла и поверхности горячего радиатора, соответственно.

Расчет коэффициента конвективного теплообмена a в промежутке между источником тепла и горячим радиатором проведен по формуле [8, 9]:

$$a = \text{Nu} \lambda / d',$$

где Nu — критерий Нусельта;

λ — теплопроводность газовой смеси при средней температуре $T' = (T_Q + T_H)/2$ в промежутке;

d' — эквивалентный диаметр промежутка.

При условии $\text{GrPr} \leq 10^3$ (Gr , Pr — критерии Грасгофа и Прандтля, соответственно) передача тепла от газовой смеси к теплоприемной поверхности горячего радиатора осуществляется теплопроводностью ($\text{Nu}=1$) и характеризуется эквивалентным коэффициентом теплопроводности $\lambda_e = \lambda / d'$.

Тепло Q_2 , отводимое от холодного радиатора в окружающую среду:

$$Q_2 = a''(T_c - T_0)S_{cr}, \quad (9)$$

где a'' — коэффициент конвективного теплообмена холодного радиатора с окружающей средой;

S_{cr} — площадь теплоотдающей поверхности холодного радиатора.

Потери тепла с продуктами реакции горения Q_3 :

$$Q_3 = g_f \left[\left(c_2 \left(\frac{T_Q + T_H}{2} - 100 \right) + \lambda' + c_3 (100 - T_0) \right) m_2 + (m_1 c_1 + m_0 c_0) \left(\frac{T_Q + T_H}{2} - T_0 \right) \right]. \quad (10)$$

Потери тепла Q'_4 с верхнего торца источника тепла [9]:

$$Q'_4 = a_0(T_Q - T_0)S_T + \epsilon\sigma_0(T_Q^4 - T_0^4)S_T, \quad (11)$$

$$a_T = \text{Nu} \lambda / d$$

где a_T — коэффициент конвективного теплообмена при отведении тепла от верхнего торца источника тепла;

S_T — площадь торца.

$\text{Nu} = 0,702(\text{GrPr})^{0,25}$;

d — диаметр торца;

Принято [9], что потери тепла с нижнего торца Q'_4 составляют $0,5Q'_4$.

Потери тепла Q_5 с поверхности конструктивных элементов источника тепла:

$$Q_5 = \frac{S_i \lambda_i}{l_i} (T_Q - T_0), \quad (12)$$

где S_i , λ_i , l_i — площадь сечения, теплопроводность материала и длина газоподводящей трубки, соответственно.

Потери тепла Q_6 с поверхности элементов конструкции ТЭГ через тепловую изоляцию:

$$Q_6 = \frac{\lambda_i S_i}{L_i} (T_H - T_c), \quad (13)$$

где λ_i — теплопроводность изоляционного материала;

S_i — площадь поверхности горячего радиатора, которая не занята термоэлектрическими модулями;

L_i — толщина слоя теплоизоляции.

Решение системы уравнений (1)–(6), найденное с помощью компьютерной программы, использующей ресурсы пакета Mathcad 11, позволило определить температуры T_Q , T'_Q , T_g , T_c , T_H и скорость реакции окисления топлива на катализаторе w . На основе такого решения рассчитаны основные энергетические характеристики микрогенератора.

Влияние газодинамических условий процесса сгорания топлива на характеристики микрогенератора

В результате химической реакции сгорания топлива выделяется тепло Q , количество которого определяется из (4). Скорость реакции горения топлива при этом

$$w = \frac{a'(T'_Q - T_g)S_c}{q_0}, \quad (14)$$

где q_0 — тепловой эффект реакции.

Коэффициент конвекции a' определяется формулой [10, с. 236], полученной эмпирическим путем

$$\text{Nu} = 0,43 \text{Re}^{0,7} \text{Pr}^{4/3}. \quad (15)$$

Критерии Прандтля, Грасгофа определяются с учетом физических свойств (кинематической и динамической вязкости, теплоемкости, теплопроводности) газовой среды и зависимости этих свойств от температуры и концентрации компонентов смеси, которая образуется при сгорании органического топлива [11, 12].

Значение критерия Рейнольдса при движении газового топлива через слой волокнистой каталитической насадки рассчитано по методу Кармана [13] (критическое значение критерия Рейнольдса, определяющее изменение характера движения с ламинарного на турбулентный, $Re_{кр} = 20-40$).

Коэффициент массообмена β в слое катализатора при определенной скорости подачи топлива определяется из [14]:

$$\beta = \frac{a'}{c_g \rho_g}, \quad (16)$$

где c_g , ρ_g — теплоемкость и плотность топлива, соответственно.

Коэффициент конвективного теплообмена между поверхностью катализатора и газовым потоком a' определяется из [10]:

$$a' = \frac{Nu \lambda}{d'_0}; \quad (17)$$

$$d'_0 = \frac{4 \cdot \epsilon_k}{f}, \quad (18)$$

где λ — коэффициент теплопроводности топлива;
 d'_0 — определяющий размер;
 ϵ_k — свободный объем катализатора;
 f — удельная поверхность катализатора.

Выражение для определения разницы температур с учетом (15) получено путем обработки и обобщения экспериментальных данных [11, с. 236]:

$$T'_Q - T_g = \frac{2,32 w d'_0 q_0}{\lambda Re^{0,7} Pr^{1/3}}. \quad (19)$$

Площадь внутренней поверхности катализатора, на которой происходит химическая реакция:

$$S_c = f u, \quad (20)$$

где ρ , u — плотность и объем волокнистого катализатора, соответственно.

Полнота окисления топлива на катализаторе, а также температурные и энергетические характеристики микрогенератора зависят от количественного соотношения топлива и кислорода, поступающих на каталитический источник тепла. Оптимальное соотношение, а также количество воздуха (кислорода), которое поступает к катализатору, определяются геометрическими параметрами источника тепла и воздушным промежутком между теплоприемной поверхностью горячего радиатора и излучающей поверхностью источника тепла. Поэтому было проведено исследование зависимости основных характеристик микрогенератора от ширины проме-

жутка между каталитическим источником тепла и горячим радиатором.

Согласно суммарному уравнению химической реакции при соотношении пропан/бутан, равном 80/20,



количественное соотношение кислород/топливо $g_o/g_f = 5,3/1$ является необходимым условием полного окисления топливной смеси.

Расчеты показали, что содержание кислорода в воздушной смеси (воздуха и продуктов реакции) в промежутке между каталитическим источником тепла и теплоприемной поверхностью горячего радиатора составляет 8,8%. Для расчета объемной скорости воздушной смеси в промежутке определена средняя линейная скорость движения смеси ω , которая является функцией средней температуры смеси T' и определяется посредством решения квадратного уравнения [15]:

$$C_1 = \omega(T')^2 + C_2 \omega(T'); \quad (22)$$

$$C_1 = \frac{2gh}{\xi}; \quad C_2 = \frac{A'hv}{d'^2 \xi},$$

где g — ускорение силы тяжести;
 v — кинематическая вязкость воздушной смеси;
 h — высота промежутка;
 ξ — гидравлическое сопротивление промежутка;
 A' — коэффициент, который зависит от формы промежутка [16];
 d' — гидравлический эквивалентный диаметр промежутка (кольцевого канала), который равняется разности $R_2 - R_1$ (рис. 1, б) [16].

Критерий Рейнольдса, характеризующий соотношение сил инерции и сил вязкости в потоке воздушной смеси в промежутке между каталитическим источником тепла и теплоприемной поверхностью горячего радиатора [13], определяется выражением:

$$Re = \frac{\omega d'}{v}. \quad (23)$$

Движение воздушной смеси в канале небольшого диаметра характеризуется небольшими значениями критерия Рейнольдса. Режим движения определяется как ламинарный, а коэффициент гидравлического сопротивления не зависит от шероховатости канала и равен $\xi = A'/Re$ [16]. Объемная скорость воздушной смеси в промежутке (кольцевом канале) при ламинарном движении определена из [13]:

$$V_i = \omega(T) \pi R_1^2 \left(1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right), \quad (24)$$

где R_1 — радиус сечения каталитического источника тепла (рис. 1, а);
 R_2 — радиус сечения горячего радиатора.

Учитывая объемную скорость и плотность воздушной смеси в промежутке, найден рациональный расход топливной смеси g_f и кислорода g_o . Соотношение $5,3 g_o/g_f$ определяет температуру смеси и количество тепла Q , образованного при сгорании топлива.

Для выбранной модели исследовано влияние величины удельной тепловой мощности источника тепла q на температуру горячей стороны термобатарей микрогенератора (с учетом теплового сопротивления ТЭБ) при температуре холодной стороны ТЭБ в пределах от 30 до 70°C. Зависимость температуры горячей стороны ТЭБ T_H и температуры каталитической поверхности T_Q от удельной тепловой мощности источника тепла q приведена на **рис. 2**.

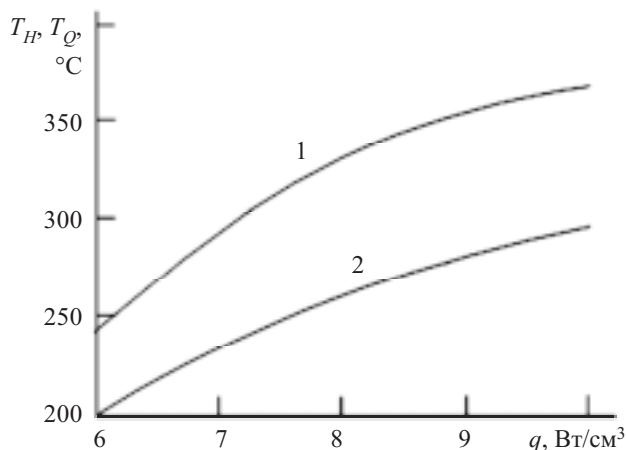


Рис. 2. Зависимость температуры каталитической поверхности T_Q (1) и температуры горячей стороны ТЭБ T_H (2) микрогенератора от удельной тепловой мощности источника тепла q при $T_C=50^\circ\text{C}$

Зависимость основных характеристик микрогенератора от теплового сопротивления ТЭБ R определена при условии стехиометрического соотношения топливо/воздух и полного сгорания топлива на катализаторе, с учетом сопротивления теплоизоляции термоэлементов и их электрического сопротивления коммутации. Зависимость электрической мощности P , удельной тепловой мощности источника тепла q , КПД микрогенератора η от теплового сопротивления ТЭБ R приведена на **рис. 3**.

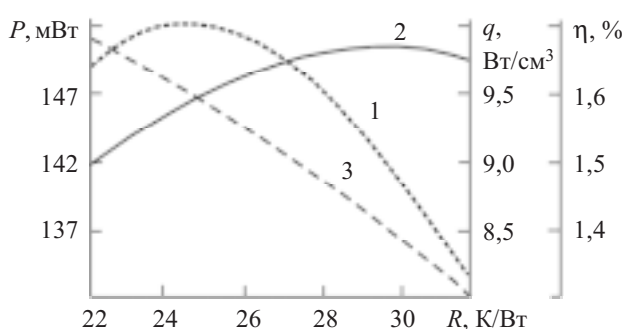


Рис. 3. Зависимость электрической мощности (1), удельной тепловой мощности источника тепла (2), КПД микрогенератора (3) от теплового сопротивления ТЭБ

Видно, что максимальная электрическая мощность микрогенератора 152 мВт достигается при тепловом сопротивлении ТЭБ $R=24-26$ К/Вт, максимальный КПД микрогенератора 1,7% достигается при тепловом сопротивлении ТЭБ $R=28-30$ К/Вт. Термоэлектрический преобразователь рассчитывают для получения максимального КПД или максимальной мощности генератора в зависимости от конкрет-

ных задач проектирования. Представленные выше исследования проведены для термоэлектрического материала с теплопроводностью $\lambda=0,014$ Вт/(см·К).

Проведенный анализ предложенной модели позволил определить рациональные конструктивные характеристики микрогенератора. Его оптимизация может достигаться в случае проведения параметрических анализов, в частности с учетом результатов исследований влияния газодинамических условий и кинетики процесса каталитического сжигания топлива на характеристики микрогенератора.

Влияние скорости химической реакции окисления топлива на температурные характеристики источника тепла в составе генератора определено в зависимости от расхода топлива (**рис. 4**). Видно, что зависимость температуры каталитического источника тепла от расхода топлива с учетом скорости реакции (кривая 2), в отличие от аналогичной зависимости при полном сгорании топлива (кривая 1), имеет максимум при расходе топлива около 0,7 г/ч, поскольку каталитический источник тепла имеет верхнюю границу по расходу топлива, превышение которой приводит к уменьшению степени превращения топлива.

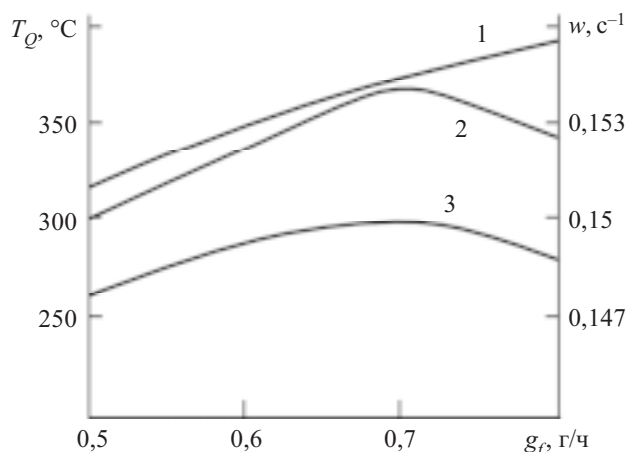


Рис. 4. Зависимость от расхода топлива температуры каталитического источника тепла при полном сгорании топлива (1) и с учетом скорости реакции (2), а также скорости химической реакции (3)

Рассчитаны основные энергетические и тепловые характеристики микрогенератора в зависимости от ширины воздушного промежутка между каталитическим источником тепла и горячим радиатором (с учетом потерь тепла на нагрев избытка воздуха в промежутке), которые позволяют определить необходимую ширину промежутка в микрогенераторе.

Для получения максимального КПД и максимальной электрической мощности в микрогенераторе заданных размеров рациональным является промежуток около 2,3 мм, который позволяет достичь электрической мощности 150 мВт и КПД 1,67% ($g_f=0,71$ г/ч) (**рис. 5**). Последующее увеличение ширины промежутка до 2,5 мм приводит к потере большого количества тепла на нагрев избытка воздуха ($5,3g_o/g_f \gg 1$), что, в свою очередь, приводит к снижению электрической мощности до 140 мВт и КПД микрогенератора до 1,55%.

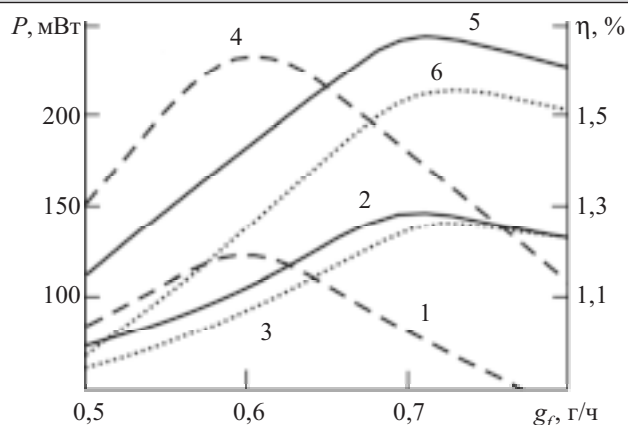


Рис. 5. Зависимость электрической мощности P (1, 2, 3) и КПД (4, 5, 6) микрогенератора от расхода топлива при ширине промежутка 2 мм (1, 4), 2,3 мм (2, 5), 2,5 мм (3, 6) ($T_C=50^\circ\text{C}$, $R=28\text{--}30\text{ К/Вт}$, $\lambda=0,014\text{ Вт/(см}\cdot\text{К)}$)

В промежутке шириной 2 мм стехиометрическое соотношение топливо/кислород и полное сгорание топлива возможны при расходе топлива 0,6 г/ч. Удельная тепловая мощность источника тепла при этом достигает $7,5\text{ Вт/см}^2$, что предопределяет уменьшение электрической мощности (124 мВт) и КПД микрогенератора (1,6%). Видно, что с увеличением ширины промежутка максимум электрической мощности и КПД микрогенератора смещается в область больших значений расхода топлива и больших тепловых мощностей источника тепла. Ширина воздушного промежутка около 2,3 мм позволяет обеспечить наиболее эффективный рабочий режим генератора при условии стехиометрического соотношения топливо/кислород и полного сгорания топлива.

С целью определения рациональной конструкции конусовидного сопла исследован процесс выхода воздушной смеси из горячего радиатора. С учетом объемного расхода и напора воздушной смеси, которая проходит сквозь сопло наружу (в окружающую среду), рассчитан необходимый диаметр выходного отверстия (7,3 мм) и высота конусовидного сопла (7 мм) при ширине промежутка в горячем радиаторе 2,3 мм.

Заключение

Построена и исследована физическая модель термоэлектрического микрогенератора с каталитическим источником тепла. Компьютерными методами определены рациональные тепловые, кинетические и газодинамические характеристики, а также необходимые для проектирования конструктивные параметры генератора.

Предложен метод повышения эффективности микрогенератора с каталитическим источником тепла путем согласования системы теплообмена, конструктивных характеристик и свойств термоэлектрических батарей. С учетом скорости химической ре-

акции окисления топлива и соотношения топливо/воздух, поступающих на катализатор, определены рациональный воздушный промежуток между источником тепла и горячим радиатором, рабочий интервал расхода топлива — 0,6—0,8 г/ч и величина тепловой нагрузки — 6—10 Вт/см³.

Установлены параметры ТЭБ из материала на основе Bi_2Te_3 для микрогенератора в интервале мощностей 130—150 мВт. Показано, что при использовании термоэлектрического материала с теплопроводностью $0,014\text{ Вт/(см}\cdot\text{К)}$ можно ожидать получения КПД микрогенератора на уровне 1,7%.

Окончательные выводы о достижимых параметрах микрогенераторов и оптимизации их конструкции авторы намерены опубликовать после экспериментальной проверки макета, спроектированного на основе исследований, представленных в настоящей публикации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Анатычук Л. И., Семенюк В. А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов.— Черновцы: Прут, 1992.
2. Охотин А. С., Ефремов А. А., Охотин В. С., Пушкарский А. С. Термоэлектрические генераторы.— М.: Атомиздат, 1971.
3. Котирло Г. К., Лобунец Ю. Н. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов.— Киев: Наукова думка, 1980.
4. Jacquot A., Liu W. L., Chen G. et al. Fabrication and modeling of an in-plane Thermoelectric micro-generator // Proc. of the 21st International conference thermoelectrics.— Long Beach, CA.— 2002.— P. 561.
5. Maruta K., Takeda K. Catalytic combustion in microchannels for MEMS power generation // The third asia-pacific conference on combustion.— Seoul, Korea.— June 24—27, 2001.
6. Sitzki L., Borer K., Schuster E. et al. Combustion in microscale heat-recirculating burners // Ibid.— P. 86—94.
7. Михайловський В. Я. Термоелектричні мікрогенератори з каталітичним спалюванням пропан-бутану // Термоелектрика.— 2002.— № 4.— С. 86—90.
8. Исаев С. И., Миронов Б. М., Никитин В. М., Хвостов В. И. Основы термодинамики, газовой динамики и теплопередачи.— М.: Машиностроение, 1968.
9. Григорьев В. А., Зорин В. М. Тепло- и массообмен. Тепло-технический эксперимент.— М.: Энергоиздат, 1982.
10. Боресков Г. К. Гетерогенный катализ.— М.: Наука, 1986.
11. Марголис Л. Я. Гетерогенное каталитическое окисление углеводородов.— Л.: Химия, 1967.
12. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии.— М.: Госхимиздат, 1962.
13. Романков П. Г., Курочкина М. И. Гидромеханические процессы химической технологии.— Л.: Химия, 1974.
14. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.— М.: Наука, 1967.
15. Варгина А. Б., Ковальский Р. В. Тепловой расчет термоэлектрических генераторов с естественной циркуляцией теплоносителя // Энергетика и транспорт.— 1980.— № 1.— С. 170—175.
16. Никольский Б. П. Справочник химика. III том.— Л.: Госхимиздат, 1952.