

УДК 536.46

Разработка и экспериментальное исследование малоразмерных термоэлектрических энергопреобразующих устройств с диффузионным горением*

Р.В. Фурсенко, С.С. Минаев, Д.В. Чусов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: roman.fursenko@gmail.com

Представлены лабораторные образцы малоразмерных энергопреобразующих устройств, использующих термоэлектрические методы конверсии тепла, источником которого служит диффузионное микропламя. Экспериментально изучены процессы горения, энергопреобразования и охлаждения в предложенных системах. Показана относительно высокая эффективность энергопреобразования исследуемых систем (0,8 % при вырабатываемой электрической мощности 130 мВт), соответствующая существующему мировому уровню для подобных устройств. Преимуществом предлагаемых энергогенераторов является отсутствие системы принудительного охлаждения и катализаторов, простота сборки и использование доступных материалов и компонентов. На основании результатов исследований определены возможные пути дальнейшего совершенствования тестовых образцов с целью повышения эффективности энергопреобразования.

Ключевые слова: малоразмерные энергопреобразующие устройства, диффузионное горение, термоэлектричество.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрое развитие вычислительных систем, средств связи, робототехнических изделий, средств передачи и получения информации стимулировали активные исследования в области создания автономных источников энергии микро- и мезомасштабов, обеспечивающих эксплуатацию таких устройств. Автономные системы, преобразующие энергию водорода и углеводородных топлив в электроэнергию, имеют потенциальное преимущество перед современными литиевыми аккумуляторами за счет высокой гравиметрической плотности энергии таких топлив. Создание автономных, компактных и экологически безопасных источников энергии стало возможным благодаря разработке низкотемпературных твердополимерных топливных элементов с протонообменной мембраной. Однако практическое использование топливных элементов встречает ряд значительных трудностей, таких как: высокая стоимость элементов, связанная с использованием в них драго-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-08-00546-а).

ценных металлов, высокие требования, предъявляемые к чистоте газа, быстрый выход из строя дорогостоящей и высокотехнологичной протонообменной мембраны. Альтернативным способом преобразования энергии, активно развивающимся в последнее время, является использование термоэлектрических и термофотоэлектрических методов преобразования тепла и теплового излучения, выделяющихся при сгорании водорода и углеводородных топлив в микрокамерах сгорания. Относительно низкая стоимость применяемых компонентов и материалов, отсутствие жестких требований к чистоте газов, экологичность и безопасность делают этот подход привлекательным с точки зрения использования в малоразмерных автономных источниках энергии. Учитывая, что преобразование энергии горючего газа в электричество даже с относительно низкой (~1 %) эффективностью может приводить к увеличению времени автономной работы и/или снижению веса электрических или электромеханических систем, в которых в настоящее время используются аккумуляторные батареи [1], развитие этого подхода представляется перспективным.

В то же время, создание малоразмерных энергопреобразующих устройств наталкивается на ряд трудностей, связанных со сложностью организации устойчивого горения в микрокамерах сгорания из-за высокого уровня тепловых потерь в элементы конструкции. Для преодоления этих трудностей в малоразмерном энергопреобразующем устройстве, разработанном группой ученых Принстонского университета [2], был применен каталитический микрореактор с тепловой рециркуляцией. Размеры устройства, произведенного из алюминиевой керамики и, использующего платину в качестве катализатора, составили ~0,7 см³, а выходной мощности было достаточно для питания лампочки 100 мВт. Лабораторные образцы термоэлектрических и термофотоэлектрических энергогенераторов на основе каталитических микрогорелок были также разработаны в Массачусетском технологическом институте (США) [3, 4]. Эффективность энергопреобразования этих систем составляла 0,02-0,08 % при вырабатываемой электрической мощности 1–75 мВт. Ученые из японской компании Matsushita Electric Works и Университета Тохоку (Япония) достигли трехпроцентной эффективности и выходной мощности 138 мВт на предложенном ими энергопреобразующем устройстве, основанном на термоэлектрической конверсии тепла, выделяющегося в результате каталитического горения. В работе [5] сообщалось о рекордной эффективности 2,4 %, достигнутой в энергопреобразующем устройстве с термофотоэлектрическими элементами и эмиттером на основе селективно излучающего материала. В устройстве использовалось эффективное устройство регенерации тепла, позволяющее повысить температуру эмиттера до 2000 К, и применялось водяное охлаждение. Высокие требования к точности сборки описанных выше устройств и необходимость использования дорогостоящих материалов, в частности катализаторов, необходимых для поддержания горения, ограничивают их широкое применение. Группой исследователей из ИТПМ СО РАН и ИФП СО РАН была предложена конструкция энергопреобразующего устройства с термофотоэлектрическим методом преобразования тепловой энергии. Созданный лабораторный образец был нечувствителен к качеству топлива и мог работать на самых различных дешевых и низкокалорийных углеводородных видах топлива. Эффективность системы при этом составляла 0,1–0,5 %.

Целью настоящей работы является разработка энергопреобразующего устройства, обладающего всеми достоинствами описанных выше систем. Предлагаемый энергогенератор не содержит системы принудительного охлаждения, обладает малыми размерами и позволяет отказаться от использования дорогих катализаторов для поддержания процессов горения. Прогнозируемая низкая стоимость устройства

обеспечивается простотой сборки и использованием доступных материалов и компонентов. Экспериментально изучены процессы горения, энергопреобразования и охлаждения в предложенных системах. На основании результатов исследований определены возможные пути дальнейшего усовершенствования тестовых образцов с целью повышения эффективности энергопреобразования.

Недавние исследования каталитического гидролиза боргидрида натрия свидетельствуют о возможности создания компактных, недорогих и безопасных систем хранения и генерации водорода [6]. Использование таких систем в качестве источников газа для малоразмерных автономных энергопреобразующих установок позволяет отказаться от газовых баллонов и, следовательно, уменьшить габариты устройств, повысить их безопасность и упростить процесс перезарядки. В связи с потенциальной взрывоопасностью предварительно перемешанных воздушно-водородных смесей, в предлагаемом устройстве в качестве источника тепла используется диффузионное микропламя, стабилизированное на конце капилляра, через который производится подача горючего газа.

1. ОПИСАНИЕ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Принципиальная схема энергопреобразующего устройства включает в себя термоэлектрический преобразователь, работающий на перепаде температур между твердым телом, нагреваемым диффузионным микропламенем, и телом, имеющим достаточно низкую температуру, близкую к комнатной, за счет естественной конвекции. В рамках настоящей работы было создано два лабораторных образца энергопреобразующих устройств, показанных на рис. 1, *a*, *b*. В системе, показанной на рис. 1, *a*, диффузионное пламя, стабилизированное на конце капилляра 1, нагревает изогнутую медную пластину 2. Медная пластина большой площади 3 обеспечивает отвод тепла от холодной части термоэлектрического преобразователя, установленного между пластинами 2 и 3, за счет высокой теплопроводности и конвективного теплообмена в окружающую среду. На “горячей” и “холодной” пластинах на расстоянии 3 мм от термоэлектрического модуля были установлены хромель-алюмелиевые термопары для контроля температуры поверхности ТЭ модуля. Модельная система 1*a* используется для проведения предварительных экспериментов, поскольку позволяет визуально наблюдать пламя и производить температурные измерения на элементах устройства. В то же время, с практической точки зрения эта система неэффективна, поскольку лишь небольшая часть полного потока тепла преобразуется в электроэнергию. Образец, представленный на рис. 1, *b*, состоит из медного полусферического купола с прорезями 2, который нагревается диффузионным пламенем. Пластины 3 обеспечивают естественное охлаждение одной из рабочих поверхностей термоэлектрических модулей 4, установленных по периметру купола 2. Система позволяет использовать пять последовательно соединенных термоэлементов и обладает существенно более высокой эффективностью энергопреобразования за счет более полного использования тепла, генерируемого пламенем. В обеих рассматриваемых системах использовались малоразмерные термоэлектрические модули марки ТВ компании “Криотерм” (Санкт-Петербург) размером 3×3 мм.

Выбор геометрии представленных лабораторных образцов обусловлен требованиями, предъявляемыми к автономным источникам энергии, а именно: простота сборки, доступность используемых материалов и компонентов, безопасность. Использование в качестве источника тепла диффузионного микропламени обеспе-

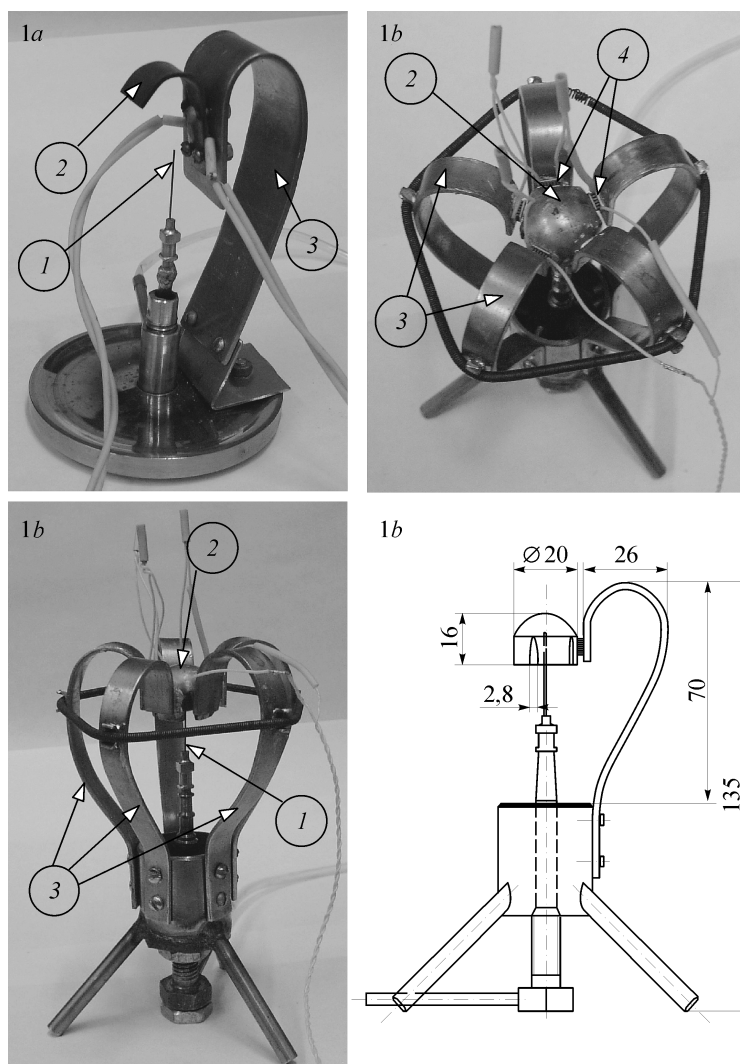


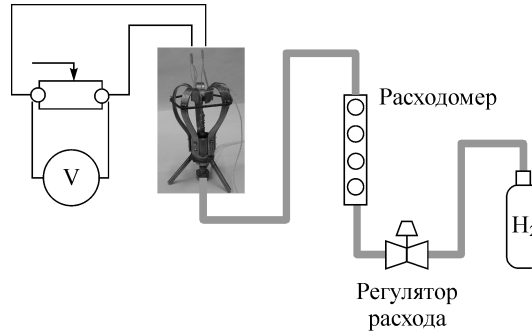
Рис. 1. Лабораторные образцы энергопреобразующих устройств 1а и 1б.

1 — капилляр, 2 — нагреваемая пластина, 3 — радиаторные пластины, 4 — термоэлектрические модули.

чивает стабилизацию пламени в широком диапазоне расходов газа и позволяет отказаться от использования предварительно перемешанных горючих смесей, которые являются потенциально взрывоопасными и подготовка которых требует использования дополнительных систем, например, инжектирования. Нагреваемый элемент энергопреобразующей системы 1б представляет собой полусферический купол, обеспечивающий образование застойной зоны продуктов горения, что способствует более полному использованию тепла, выделяющегося в результате химической реакции.

Схема экспериментальной установки, использовавшейся для исследования характеристик образцов энергопреобразующих устройств, приведена на рис. 2. Водород из баллона через регулятор расхода газа и пузырьковый расходомер подавался в капилляр, на конце которого инициировалось диффузионное пламя. Электрическая схема энергопреобразующего устройства состояла из последовательно соединенных термоэлементов и нагрузки, в качестве которой использовался

Рис. 2. Схема экспериментальной установки.



магазин сопротивлений. Напряжение на нагрузке измерялось вольтметром. Для образца 1а дополнительно измерялось напряжение на термопарах, установленных на нагреваемой и охлаждающей медной пластине

в непосредственной близости к термо-электрическому модулю. На основании этих измерений были получены данные о температурах на “горячей” и “холодной” пластинах.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе экспериментальных исследований образцов энергопреобразующих устройств измерялся расход водорода Q и напряжение на нагрузке U . На основании этих данных вычислялась электрическая мощность $W_{el} = U^2 / R$, где R — сопротивление нагрузки, и поток химической энергии $W_{ch} = Q \cdot J$, определяемый как произведение расхода Q и удельной теплоты сгорания водорода J . КПД преобразования химической энергии в электрическую равен отношению производимой электрической мощности к полной химической энергии, поступающей в систему в единицу времени $\eta = W_{el} / W_{ch}$.

2.1. Энергопреобразующее устройство 1а

На рис. 3 приведены зависимости электрической мощности и КПД системы 1а от сопротивления нагрузки, полученные при различных значениях расхода водорода. Вырабатываемая мощность и КПД достигают максимума при сопротивлении нагрузки, близком к внутреннему сопротивлению термоэлектрического модуля, что согласуется с элементарной теорией электрических цепей.

Результаты измерений температуры на пластине, нагреваемой диффузионным пламенем, и на радиаторной пластине приведены на рис. 4, а. Температуры “горячей” и “холодной” пластины линейно возрастают с увеличением расхода горючего газа, при этом температура “горячей” пластины растет значительно быстрее

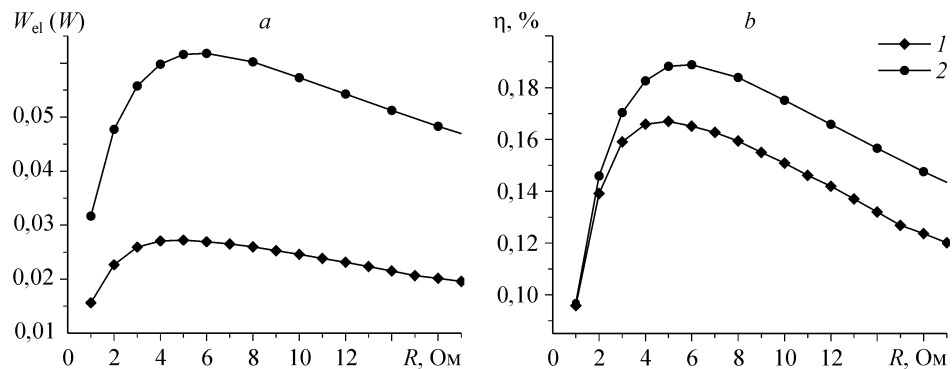


Рис. 3. Зависимости электрической мощности (а) и КПД (b) энергопреобразующей системы 1а от сопротивления внешней нагрузки при различных расходах водорода.

$Q = 1,51$ (1), $3,03$ (2) мл/с.

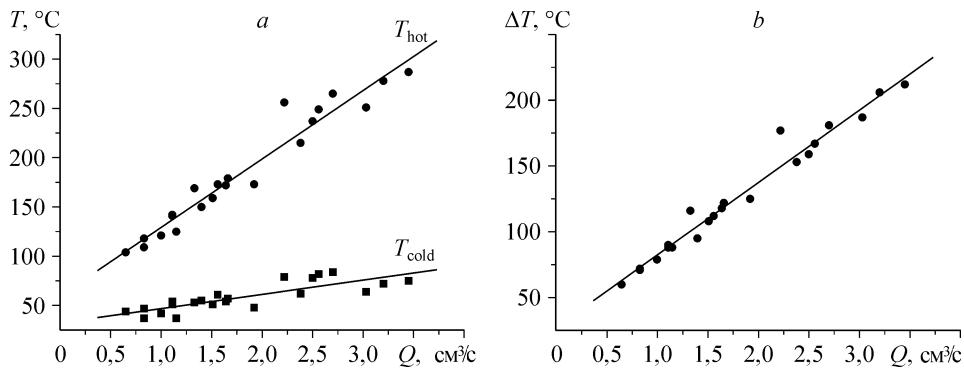


Рис. 4. Зависимости температуры на “холодной” и “горячей” пластинах (а) и перепада температур между пластинами (b) от расхода водорода.

температуры радиатора. На основании этого можно сделать вывод о достаточной эффективности используемого метода охлаждения термоэлектрического модуля. Разность температур между “горячей” и “холодной” пластинами также линейно возрастает с увеличением скорости подачи водорода (рис. 4, b) и в исследуемом диапазоне расходов достигает значения 200°C . Перепад температур между пластинами, равный 200°C , примерно соответствует перепаду в 100°C на рабочих сторонах термоэлектрического модуля, что близко к предельно допустимому значению для использовавшихся в экспериментах термоэлементов. В связи с этим исследования с большими расходами водорода не проводились.

Электрическая мощность, вырабатываемая термоэлектрическим модулем, пропорциональна перепаду температур на рабочих сторонах модуля. Экспериментальная зависимость электрической мощности от расхода водорода при сопротивлении нагрузки $R = 10$ Ом и линейная функция $f(Q) = aQ - b$, аппроксимирующая эту зависимость в области исследуемых расходов, приведены на рис. 5. Из линейной зависимости электрической мощности от расхода следует, что КПД энергопреобразующего устройства $\eta = W_{\text{el}}/W_{\text{ch}} \approx a/J - b/QJ$ монотонно возрастает с увеличением скорости подачи водорода. Если предположить, что при дальнейшем возрастании расхода Q зависимость $W_{\text{el}}(Q)$ описывается функцией $f(Q)$, то можно оценить максимальный теоретически возможный КПД системы по формуле $\eta_{\text{max}} = (aQ - b)/Q \cdot J \xrightarrow{Q \rightarrow \infty} a/J$, что составляет $0,19\%$. На рис. 6 приведена экспериментальная зависимость КПД системы 1а от расхода водорода и аппрок-

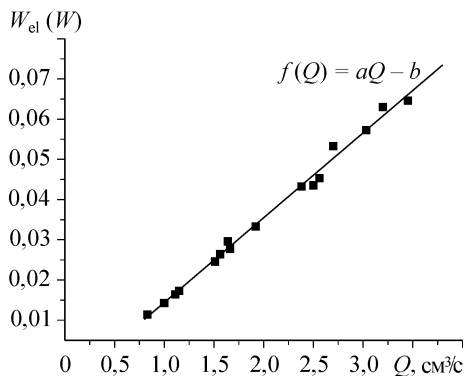


Рис. 5. Зависимость электрической мощности от расхода водорода при сопротивлении нагрузки $R = 10$ Ом.

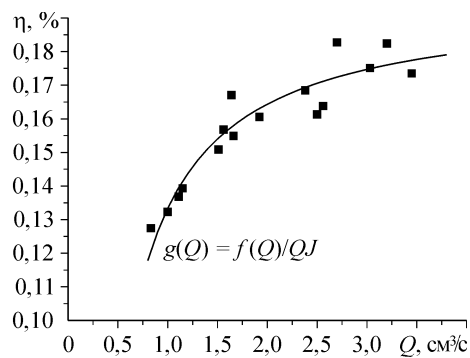
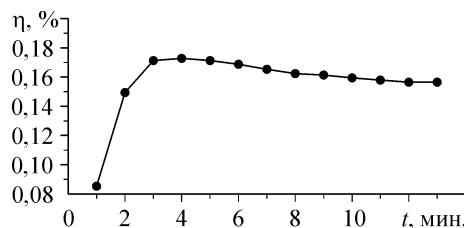


Рис. 6. Зависимость КПД системы 1а от расхода водорода при сопротивлении нагрузки $R = 10$ Ом.

Рис. 7. Зависимость КПД системы 1а от времени при расходе водорода $Q = 2,5 \text{ см}^3/\text{с}$ и сопротивлении нагрузки $R = 10 \text{ Ом}$.



симирующая ее зависимость $g(Q) = f(Q)/QJ = a/J - b/QJ$. Максимальный КПД для исследуемого диапазона расходов, ограниченного сверху значением, при котором перепад температуры на рабочих сторонах термоэлектрического модуля достигает критического значения, составляет 0,175 %, что близко к полученной выше теоретической оценке. Можно предположить, что использование более термостойких модулей, позволяющих расширить диапазон рабочих расходов, не приведет к существенному увеличению КПД системы. В то же время, увеличение потока химической энергии позволяет увеличить электрическую мощность, производимую устройством.

Важным показателем, влияющим на производительность энергопреобразующего устройства, является эффективность системы охлаждения одной из рабочих сторон термоэлектрического модуля, которая необходима для поддержания рабочей разности температур на термоэлементе. В исследуемых системах в роли радиатора выступает медная пластина, обеспечивающая естественное охлаждение термоэлектрического модуля за счет процессов теплопроводности и теплообмена с окружающей средой. Исследование временной зависимости температур на “горячей” и “холодной” пластинах показали, что при расходах водорода $2-2,5 \text{ см}^3/\text{с}$ температура радиаторной пластины меняется на $20 \text{ }^\circ\text{C}$ за 14 мин. При этом скорость роста температуры замедляется со временем и приближается к некоторому постоянному значению. Электрическая мощность и КПД системы 1а на начальном этапе возрастают и достигают своего максимального значения через 3–4 минуты после включения устройства (рис. 7). Затем значения электрической мощности и КПД начинают уменьшаться, приближаясь к некоторому постоянному значению, что обусловлено нагреванием радиаторной пластины и последующим установлением в ней постоянной температуры. По-видимому, можно сделать вывод, что система естественного охлаждения является достаточно эффективной и позволяет поддерживать долговременную работу энергопреобразующего устройства в постоянном режиме.

Визуальное наблюдение диффузионного пламени, стабилизированного на конце капилляра, позволяет сделать вывод об устойчивости пламени и его низкой чувствительности к теплотерям в элементы устройства и внешним воздействиям в широком диапазоне расходов водорода.

2.2. Энергопреобразующее устройство 1b

Экспериментальные исследования тестового образца 1а позволили выявить основные особенности процессов горения, энергопреобразования и охлаждения, характерные для систем, использующих термоэлектрические методы конверсии тепла, источником которого служит диффузионное микропламя. В то же время, эффективность исследуемого образца достаточно низка в силу большой величины доли тепла, не участвующего в процессе энергопреобразования. Можно предположить, что увеличение числа термоэлектрических модулей, а также доли полного потока тепла от сгорания, используемой для нагревания одной из рабочих сторон модулей, позволит повысить эффективность преобразования химической энергии в электрическую. Образец энергопреобразующего устройства, представленный на рис. 1, b, допускает использование пяти последовательно соединенных термоэлектрических модулей. Большая часть потока тепла, выделяющегося при сгорании диффузионного пламени, окруженного полусферическим куполом, идет

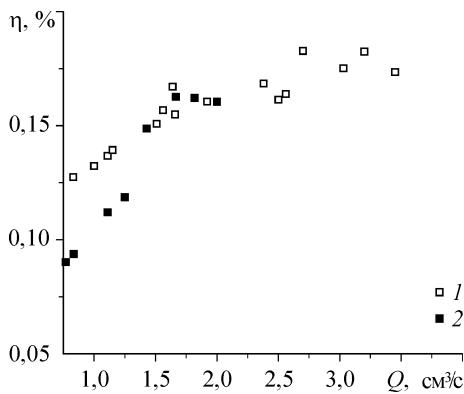


Рис. 8. Зависимость КПД систем 1а (1) и 1б с одним термоэлектрическим модулем (2) от расхода водорода при сопротивлении нагрузки $R = 10 \text{ Ом}$.

на нагрев рабочих сторон термоэлектрических модулей, контактирующих с боковой поверхностью купола. Другая сторона термоэлементов контактирует с системой естественного охлаждения, аналогичной системе использовавшейся в образце 1а.

На рис. 8 представлены экспериментальные зависимости КПД системы

1б от расхода водорода, полученные в случае включения в электрическую цепь только одного термоэлектрического модуля. Для сравнения на рис. 8 также приведены результаты, полученные при тестировании системы 1а. В области малых расходов газа КПД системы 1б оказывается меньше КПД системы 1а. Этот факт может быть объяснен влиянием на процессы диффузионного горения повышенных теплопотерь, типичных для системы 1б из-за большей площади поверхности, нагреваемой пламенем. При больших скоростях подачи водорода отношение площади нагреваемой поверхности к площади пламени уменьшается, что приводит к ослаблению влияния внешних теплопотерь, в этом случае КПД обеих исследуемых систем совпадают.

Исследование зависимости вырабатываемой электрической мощности и КПД энергопреобразующей системы 1б от времени показали, что они качественно совпадают с результатами, полученными при тестировании образца 1а. Измерения проводились в течение 15 мин. Максимальные значения электрической мощности и КПД достигаются через 4-5 минут после включения системы, после чего начинают уменьшаться, приближаясь к некоторому постоянному значению, отличающемуся от максимального на 5–10 %.

Увеличение числа термоэлектрических модулей, последовательно включенных в электрическую цепь энергопреобразующего устройства, приводит к пропорциональному увеличению электрической мощности и КПД системы. На рис. 9, 10 представлены зависимости электрической мощности и КПД системы 1б от расхода

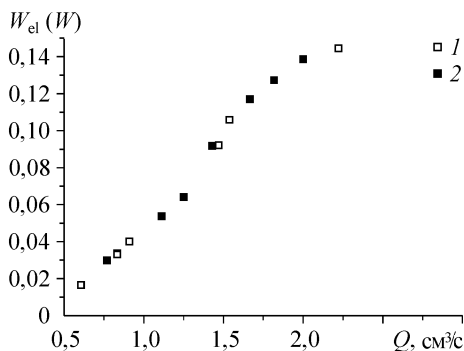


Рис. 9. Зависимость электрической мощности системы 1б от расхода водорода в случае использования четырех термоэлементов (1). Маркеры (2) соответствуют результатам измерений с одним термоэлектрическим модулем, умноженным на четыре.

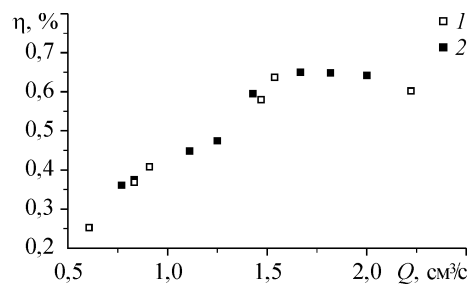


Рис. 10. Зависимость КПД системы 1б от расхода водорода в случае использования четырех термоэлементов (1). Маркеры (2) соответствуют результатам измерений с одним термоэлектрическим модулем, умноженным на четыре.

водорода в случае использования четырех термоэлементов. Черные маркеры на рис. 9, 10 соответствуют результатам измерений с одним термоэлектрическим модулем (см. рис. 8), умноженным на четыре. Приведенные на рис. 9, 10 зависимости получены при оптимальных значениях сопротивления нагрузки которое составляет 6 и 20 Ом в случае использования одного и четырех термоэлектрических модулей соответственно. Как следует из рис. 9, 10, электрическая мощность и КПД системы *1b* с четырьмя термоэлементами ровно в четыре раза превышает мощность системы с одним термоэлементом. На основании этого можно экстраполировать полученные выше результаты на случай системы *1b* с электрической цепью, включающей в себя все пять термоэлектрических модулей. Максимальный КПД, полученный в ходе исследования системы *1b* с четырьмя последовательно включенными в цепь термоэлементами, при оптимальном сопротивлении нагрузки 20 Ом, составил 0,63 %, при этом вырабатываемая электрическая мощность равнялась 0,105 Вт (см. рис. 9, 10), напряжение на нагрузке 1,4 В. Можно предположить, что включение в электрическую цепь пяти термоэлектрических модулей приведет к увеличению электрической мощности и КПД энергопреобразования до 0,13 Вт и 0,8 % соответственно. Отметим, что для системы *1b* начиная с некоторого расхода водорода КПД перестает возрастать с ростом скорости подачи газа. Такое поведение может объясняться недостаточной эффективностью охлаждения термоэлектрических модулей, связанной с меньшей, по сравнению с системой *1a*, площадью радиаторных пластин. Наличие оптимального режима работы типично для энергопреобразующих устройств [7] и должно учитываться при их проектировании.

2.3. Направление дальнейших исследований

Проведенные исследования позволили определить возможные пути повышения эффективности предлагаемых энергопреобразующих систем. Дальнейшее совершенствование лабораторных образцов будет направлено на более полное использование химической энергии горючего газа. Оптимальное расположение термоэлектрических модулей, призванное уменьшить неиспользуемую для энергопреобразования площадь нагреваемого элемента конструкции, а также эффективная тепловая изоляция позволят уменьшить потери тепла в окружающую среду. Внедрение вторичных излучателей (например, пористых тел или тонких тугоплавких нитей) в зону горения диффузионного микропламени может способствовать росту интенсивности теплового излучения и, следовательно, интенсивности теплообмена между пламенем и нагреваемыми частями устройства. Перспективным направлением повышения КПД энергопреобразования, требующим дополнительного исследования, является использование в системе периодически меняющегося расхода газа. В этом случае тепло, накопленное нагреваемыми элементами устройства за время цикла с высоким расходом газа, используется для получения электроэнергии на полупериоде с низким или даже нулевым расходом водорода, что может приводить к увеличению общей эффективности устройства за счет снижения среднего расхода горючего [8]. Кроме того, при таком режиме работы обеспечивается лучшее охлаждение термоэлектрических модулей за счет снижения общего теплового потока через радиаторные пластины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданы лабораторные образцы энергопреобразующих устройств, использующих термоэлектрические методы конверсии тепла, источником которого служит диффузионное микропламя. Разработанные образцы энергогенераторов показали относительно высокую эффективность энергопреобразования (0,8 % при вырабатываемой электрической мощности 130 мВт), соответствующую существ-

вующему мировому уровню для подобных устройств. Отличительной особенностью предлагаемых систем является использование доступных материалов, простота сборки, отсутствие необходимости использования катализаторов для поддержания процессов горения и применение системы естественного охлаждения, что позволяет снизить предполагаемую стоимость устройства. В ходе экспериментальных исследований определены оптимальные режимы работы лабораторных образцов энергопреобразующих устройств, показана эффективность применяемой системы естественного охлаждения и определены пути дальнейших исследований, направленных на повышение эффективности преобразования энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fernandez-Pello A.C.** Micropower generation using combustion: issues and approaches // Proc. Combust. Inst. 2002. Vol. 29. P. 883–899.
2. **Vican J., Gajdeczko B.F., Dryer F.L., Milius D.L., Aksay I.A., Yetter R.A.** Development of a microreactor as a thermal source for MEMS power generation // Proc. Combust. Inst. 2002. Vol. 29. P. 909–916.
3. **Schaevitz S.B., Franz A.J., Jensen K.F., Schmidt M.A.** A combustion-based mems thermoelectric power generator // Transducers '01, The 11 Inter. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. Munich, Germany, June 2001. P. 30–33.
4. **Nielsen O.M., Arana L.R., Baertsch C.D., Jensen K.F., Schmidt M.A.** A Thermophotovoltaic Micro-Generator for Portable Power Applications // Transducers '03, The 12 Inter. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. Boston, MA, June 2003. P. 714–717.
5. **Durisch W., Bitnar B., von Roth F., Palfinger G.** Small thermophotovoltaic prototype system // Solar Energy, 2003. Vol. 75. P. 11–15.
6. **Симагина В.И., Нецкина О.В., Комова О.В.** Гидридные материалы — компактная форма хранения водорода для портативных топливных элементов // Альтернативная энергетика и экология. 2007. № 10. С. 54–64.
7. **Минаев С.С., Фурсенко Р.В.** Оценка эффективности малоразмерного термоэлектрического канала для преобразования тепла от горения газа в электричество // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 4. С. 15–22.
8. **Фурсенко Р.В., Чанг К.С., Чао Я.С.** Особенности горения в узком канале переменного сечения в условиях периодически меняющегося потока газа // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 5. С. 16–24.

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2009 г.