

ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАЛОРАЗМЕРНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАНАЛА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛА ОТ ГОРЕНИЯ ГАЗА В ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

С. С. Минаев, Р. В. Фурсенко

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
minaev@itam.nsc.ru

Исследованы стационарные режимы горения и выполнены оценки эффективности энергопреобразующей системы, представляющей собой канал с термоэлектрическими преобразователями, расположенными в стенках. Внутри канала происходит горение предварительно перемешанной смеси газов. Показано, что для достижения максимальной эффективности энергопреобразования в малоразмерном устройстве свойства термоэлектрических материалов, геометрия устройства и другие параметры должны быть согласованы с внутренней структурой пламени. В частности, показано, что эффективность энергопреобразования в малоразмерном устройстве может быть выше, чем у аналогичного крупномасштабного устройства, и что максимальная эффективность достигается вблизи пределов существования пламени.

Ключевые слова: пламя, пределы распространения, микросистемы, термоэлектричество.

ВВЕДЕНИЕ

Тенденция к миниатюризации механических и электромеханических устройств [1] требует создания новых малоразмерных источников электроэнергии, поскольку плотность энергии на единицу массы или объема существующих батарей и аккумуляторов затрудняет их применение в малоразмерных устройствах. Системы с микрогорением и прямыми методами преобразования тепла от сгорания углеводородных топлив в электричество потенциально могли бы заменить существующие источники электроэнергии, поскольку плотность химической энергии углеводородных топлив выше плотности энергии в аккумуляторах [2]. Для процессов горения в малоразмерных системах характерны сильно неадиабатические условия, которые затрудняют организацию устойчивого горения. Другой трудностью, возникающей на пути создания микроэлектрогенераторов с прямыми методами преобразования, является необходимость создания большого температурного градиента на рабочих сторонах преобразователя, например на термоэлементе, а также низкая эффективность преобразования тепла в электричество. Один из возможных путей решения этих проблем состоит в исполь-

зовании систем с регенерацией тепла [3, 4]. В малоразмерных горелочных устройствах тепловая регенерация может осуществляться либо конвективным способом, как в горелке «Swiss roll» [5], либо кондуктивным — за счет переноса тепла по теплопроводящим стенкам горелочного устройства.

Структура газофазных пламен в системах с конвективным и кондуктивным способами регенерации тепла изучалась в работах [3–6]. Теоретически и экспериментально было показано, что в таких системах возможно устойчивое горение за пределами бедных смесей газов, а также горение газа в каналах, поперечный размер которых меньше критического значения, рассчитанного по классической теории [7, 8] в приближении постоянства температуры стенок. В этих работах были определены области существования различных режимов горения и пределы существования пламени.

В работах [6, 9–12] теоретически и экспериментально исследовалось распространение пламени в узком канале с теплопроводящими стенками. Такая система является модельным примером горелки с кондуктивным способом регенерации тепла. Было показано, что перенос тепла от продуктов горения в свежую смесь по теплопроводящим стенкам канала приводит к расширению пределов существования пламени. В частности, показано, что в такой системе возможно устойчивое горение в случае, когда

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 05-02-16408(а) и 05-08-50278(а)).

диаметр канала меньше критического значения, рассчитанного по начальной температуре.

Несмотря на значительное число работ, посвященных описанию процессов горения в системах с регенерацией тепла, оценки эффективности энергопреобразования в таких системах практически отсутствуют. Целью настоящей работы является получение оценок эффективности модельной системы, представляющей собой узкий канал с термоэлектрическими преобразователями, внутри которого происходит горение предварительно перемешанной смеси газов. Получены оценки оптимальных параметров задачи, характеризующих как геометрию устройства, теплофизические свойства материала стенок и горючего газа, так и термоэлектрические свойства материалов преобразователя.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

При горении предварительно перемешанной смеси газов в узком канале его стенки нагреваются и часть тепла теряется в окружающую среду. Другая часть тепла передается от продуктов горения в свежую смесь по теплопроводящим стенкам, обеспечивая тепловую рециркуляцию. В рассматриваемой системе поток тепла, идущий от стенок канала в окружающую среду, преобразуется в электричество с помощью термоэлементов.

На рис. 1 приведена схема модельной системы, в которой происходит горение газа. Тепло, выделяющееся при горении, преобразуется в электрическую энергию с помощью последовательно соединенных термоэлементов (термопар), расположенных в стенках канала. Свежая смесь движется по каналу со скоростью \tilde{V} в положительном направлении вдоль оси x . Счи-

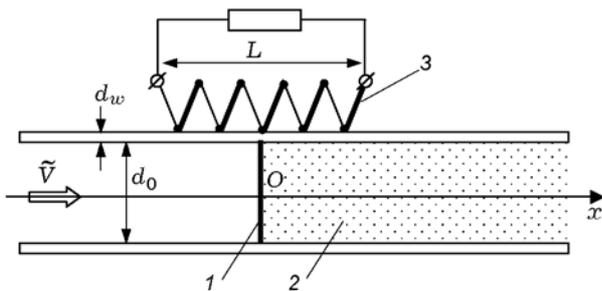


Рис. 1. Схема термоэлектрического канала:
1 — фронт пламени, 2 — продукты горения, 3 — термоэлемент

тается, что фронт пламени представляет собой поверхность, разделяющую свежую смесь и продукты горения. Фронт пламени находится в плоскости $x = 0$. Термоэлектрическое устройство расположено симметрично относительно начала координат ($-L/2 < x < L/2$). Части термоэлектрических элементов, выполненные из разных материалов, обозначены толстыми и тонкими линиями.

Эффективность системы определяется как отношение электрической мощности W_{el} , генерируемой устройством, к потоку химической энергии топлива W_{ch} , поступающей в систему за единицу времени:

$$\eta = \frac{W_{el}}{W_{ch}}. \quad (1)$$

Электрическая мощность, вырабатываемая термоэлементами, соединенными с оптимальной нагрузкой, определяется формулой

$$W_{el} = 2 \frac{U^2}{4R}. \quad (2)$$

Здесь U — напряжение на концах термоэлектрического устройства, R — электрическое сопротивление устройства, равное сопротивлению нагрузки. Считается, что термоэлементы расположены по обеим сторонам канала, поэтому в формуле (2) появляется коэффициент 2.

Электрическое сопротивление для цепочки последовательно соединенных термоэлектрических элементов, показанных на рис. 2, может быть записано в виде

$$R = \frac{\tilde{L}}{\delta} (h^2 + \delta^2)^{1/2} \frac{\rho_s}{ba}, \quad (3)$$

где ρ_s — удельное сопротивление материала проводника, a — ширина канала, b — толщина пластинки термоэлектрического материала, $\tilde{L} = 2\delta n$ — длина цепочки, n — число электрических контактов между термоэлектрическими материалами, h — толщина термоэлемента,

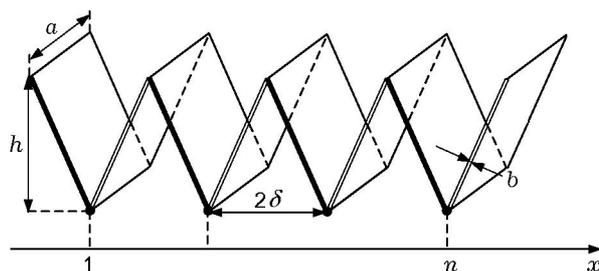


Рис. 2. Схема термоэлемента

2δ — расстояние между контактными поверхностями. Считается, что нижний ряд контактов имеет локальную температуру стенок канала, а верхний ряд контактов — температуру окружающей среды T_0 . Если $\delta \ll L$, то напряжение между концами термоэлектрического устройства может быть определено по приближенной формуле

$$U = \alpha_s \sum_{i=1}^N (\tilde{\theta}_i - T_0) \approx \frac{\alpha_s}{2\delta} \int_{-\tilde{L}/2}^{\tilde{L}/2} (\tilde{\theta}(x) - T_0) dx, \quad (4)$$

где α_s — коэффициент Зеебека для термоэлектрических материалов, T_0 — температура окружающей среды, $\tilde{\theta}(x)$ — распределение температуры в стенках канала.

Поток химической энергии, поступающей в устройство за единицу времени, равен

$$W_{ch} = \rho_g c_p \tilde{V} (T_b - T_0) d_0 a, \quad (5)$$

где c_p — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, ρ_g — плотность газа, $T_b = T_0 + Q/c_p \rho_g$ — адиабатическая температура плоского пламени для данной смеси газов, Q — удельная теплота сгорания смеси газов, T_0 — начальная температура смеси, d_0 — поперечный размер канала.

Подставляя выражения (2)–(5) в (1), получаем формулу для оценки эффективности энергопреобразования термоэлектрического канала:

$$\eta = Z(T_b - T_0) \left(\frac{\langle \tilde{\theta} - T_0 \rangle}{T_b - T_0} \right)^2 \times \times \frac{\lambda_s b \tilde{L}}{8(h^2 + \delta^2)^{1/2} \delta \rho_g c_p \tilde{V} d_0}. \quad (6)$$

Здесь $Z = \alpha_s^2 / \rho_s \lambda_s$ — коэффициент добротности термоэлектрического преобразователя, λ_s — теплопроводность материала, ρ_s — его

плотность, $\langle \tilde{\theta} - T_0 \rangle = \frac{1}{\tilde{L}} \int_{-\tilde{L}/2}^{\tilde{L}/2} (\tilde{\theta}(x) - T_0) dx$.

Для простоты будем считать, что теплопроводность термоэлектрических материалов и теплопроводность стенок канала одинаковы. При выводе (6) пренебрегалось тепловыделением, охлаждением контактов и их сопротивлением,

не учитывался также вклад джоулева тепла в распределение температуры в стенках канала.

Для вычисления эффективности системы по формуле (6) необходимо сначала определить скорость потока газа, при которой возможна стабилизация пламени, а затем найти распределение температуры в стенках канала, соответствующее найденному значению скорости потока. Определить эти зависимости можно из решения стационарной задачи о пламени, стабилизированном в узком канале с теплопроводящими стенками. Математическая модель процессов горения в такой системе была предложена в работе [10]. В приближении постоянных плотности, теплоемкости и теплопроводности газа одномерные стационарные уравнения для температуры газа, стенок канала и концентрации недостающего компонента смеси имеют вид [10]

$$V \frac{dT_{1,2}}{dx} = \frac{d^2 T_{1,2}}{dx^2} - 2\Omega(T_{1,2} - \theta), \quad (7)$$

$$\frac{d^2 \theta_{1,2}}{dx^2} - \mu\Omega(\theta_{1,2} - T_{1,2}) - \chi\mu\Omega(\theta_{1,2} - \sigma) = 0, \quad (8)$$

$$V \frac{dC_1}{dx} = \frac{1}{Le} \frac{d^2 C_1}{dx^2}, \quad C_2 = 0. \quad (9)$$

Граничные условия для системы уравнений (7)–(9) записываются в виде

$$x \rightarrow +\infty: T_2 \rightarrow \sigma; \quad (10)$$

$$x \rightarrow -\infty: T_1 \rightarrow \sigma, \quad C_1 \rightarrow 1;$$

$$x = 0: T_1 = T_2 = T_f, \quad C_1 = 0,$$

$$\frac{1}{Le} \frac{\partial C_1}{\partial x} = \exp \left\{ \frac{N}{2} \left(1 - \frac{1}{T_f} \right) \right\}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial x} - \frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{1 - \sigma}{Le} \frac{\partial C_1}{\partial x}.$$

Здесь безразмерная пространственная координата x измеряется в единицах D_{th}/U_b , где D_{th} — температуропроводность газа, U_b — адиабатическая скорость плоского пламени. Концентрация недостающего компонента смеси C отнесена к концентрации недостающего

компонента в свежей смеси C_0 . Температура стенок канала θ и температура газа T отнесены к адиабатической температуре пламени T_b ; параметр $\sigma = T_0/T_b$ — безразмерная начальная температура. Нижние индексы 1 и 2 относятся соответственно к областям свежей смеси и продуктам сгорания.

Скорость газа V измеряется в единицах U_b ; $Le = D_{th}/D_{mol}$ — число Льюиса, D_{mol} — коэффициент диффузии недостающего компонента; $N = E/RT_b$ — безразмерная энергия активации химической реакции. Безразмерный параметр теплообмена $\Omega = Nu/Pe^2$ связан с числом Нуссельта $Nu = \alpha d_0/\lambda_g$, где α — коэффициент теплообмена, и с числом Пекле $Pe = U_b d_0/D_{th}$, которые определяются для канала с поперечным размером d_0 . Параметр μ определяется по формуле $\mu = \lambda_g d_0/\lambda_s d_w$. Коэффициент

$$\chi = \frac{d_0^2 b}{\mu d_w (h^2 + \delta^2)^{1/2} \delta Nu} \quad (12)$$

в уравнении (8) определяется теплофизическими свойствами термоэлемента, показанного на рис. 2. Из рис. 2 видно, что всегда выполняется неравенство $\delta \leq b$, откуда следует верхняя оценка параметра χ :

$$\chi = \frac{d_0^2 b}{\mu d_w (h^2 + \delta^2)^{1/2} \delta Nu} \leq \frac{d_0^2}{h d_w \mu Nu}.$$

В безразмерных переменных выражение для эффективности энергопреобразования (6) может быть записано в виде

$$\eta = Z(T_b - T_0) \left(\frac{\langle \theta - \sigma \rangle}{1 - \sigma} \right)^2 \frac{\Omega L}{8V} \chi. \quad (13)$$

Здесь L — безразмерная длина термоэлектрического преобразователя, измеряемая в единицах D_{th}/U_b . Заметим, что безразмерный комплекс $Z(T_b - T_0)$ в формуле (13) зависит только от свойств материалов термоэлектрического устройства и состава горючей смеси и не зависит от геометрической конфигурации устройства. Этот параметр является важной характеристикой термоэлектрических устройств, преобразующих тепло от сгорания газа в электричество. Безразмерный комплекс

$$\Phi(Pe, d_w, \dots) = \left(\frac{\langle \theta - \sigma \rangle}{1 - \sigma} \right)^2 \frac{\Omega L}{8V} \chi \quad (14)$$

в (13) зависит от диаметра канала, толщины стенок, линейных размеров термоэлектрического преобразователя и других параметров, характеризующих геометрию устройства, свойства горючей смеси и теплофизические свойства стенок канала. Рассмотрим поведение функции Φ , с тем чтобы определить оптимальные значения параметров задачи, при которых достигается наибольшая эффективность энергопреобразования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Для вычисления функции Φ необходимо решить стационарную задачу (7)–(11) и найти распределение температуры в стенках канала при заданном значении скорости потока газа. Решение стационарной задачи существует лишь в том случае, если размер канала превышает некоторое критическое значение. При постоянной температуре стенок канала критический диаметр канала d_{0cr} не зависит от скорости газа и определяется из условия $Pe = U_b d_{0cr}/D_{th} = Pe_{cr}$. В этом случае условие распространения пламени, связывающее критический размер и свойства горючей смеси, имеет вид $Pe \geq Pe_{cr}$ [7, 8]. Кондуктивный перенос тепла по стенкам канала позволяет осуществить устойчивое горение, даже если диаметр канала меньше критического значения, соответствующего начальной температуре стенок. В канале с заданным диаметром можно рассчитать скорость газа, при которой волна горения неподвижна относительно стенок канала. Полученная зависимость скорости газа от диаметра канала имеет вид $V = G(Pe)$. На рис. 3 построены кривые $G(Pe)$ в плоскости (V, Pe) при различных отношениях d_0/d_w . Одному значению числа Пекле соответствуют два различных значения скорости потока газа (рис. 3), при котором возможно стационарное горение. В точке перегиба одному значению числа $Pe = Pe_{cr}$ соответствует одно значение скорости газа. Линейный анализ устойчивости стационарных решений показывает, что устойчивыми являются только те решения, которые лежат выше точки перегиба. Этот результат был получен ранее в теоретической работе [10] и согласуется с экспериментальными результатами [6, 9] по горению предварительно перемешанных смесей газов в узких трубках.

Решение задачи (7)–(11) подробно описано в работе [10], поэтому приведем здесь лишь

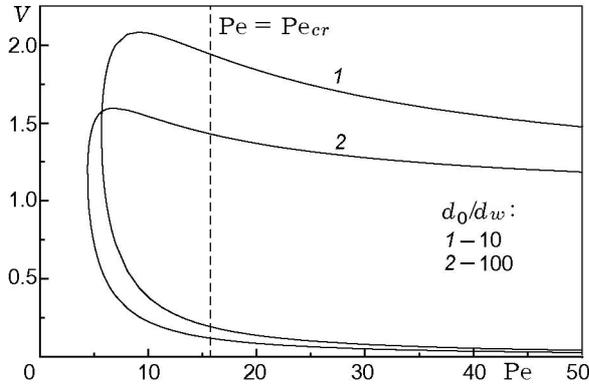


Рис. 3. Зависимость безразмерной скорости потока газа V от числа Пекле Pe при $\sigma = 0.136$, $Nu = 4$, $\lambda_g/\lambda_s = 10^{-3}$, $\chi/\mu = 0.1$, $N = 6.82$

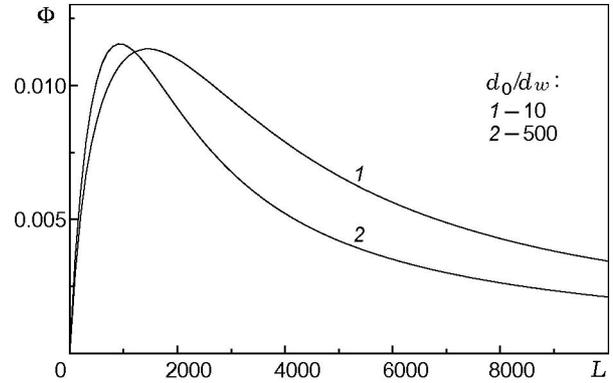


Рис. 4. Зависимость $\Phi(L)$ при $\sigma = 0.136$, $Nu = 4$, $Pe = 15$, $\lambda_g/\lambda_s = 10^{-3}$, $\chi/\mu = 0.1$, $N = 6.82$

выражения, описывающие распределение температуры в стенках канала:

$x < 0$:

$$\theta(x) = r_1(T_f - \sigma - A) \exp(\lambda_1 x) + r_2 A \exp(\lambda_2 x),$$

$x > 0$:

$$\theta(x) = r_3(T_f - \sigma - B) \exp(\lambda_3 x) + r_4 B \exp(\lambda_4 x).$$

Здесь $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ и $\lambda_3, \lambda_4 > 0$ — корни уравнения

$$\lambda^4 - V\lambda^3 - 2\Omega(1 + \mu(1 + \chi))\lambda^2 + 2V\mu\Omega(1 + \chi)\lambda + 4\Omega^2\mu\chi = 0,$$

$T_f = 1 / \left(1 - \frac{2}{N} \ln V\right)$ — температура пламени,

$r_i = -(\lambda_i^2 - V\lambda_i - 2\Omega)/2\Omega$ ($i = 1 \div 4$). Коэффициенты A и B определяются из условия непрерывности температуры $\theta(x)$ и ее производной по координате x в точке $x = 0$. Подставляя выражения (15) в формулу (14), можно рассчитать Φ как функцию параметров задачи. На рис. 4 приведены зависимости функции Φ от длины термоэлектрического устройства L , рассчитанные для различных значений d_0/d_w . С ростом длины L сопротивление преобразователя увеличивается быстрее, чем напряжение на концах термоэлектрического преобразователя, которое пропорционально

$\int_{-L/2}^{L/2} (\theta(x) - T_0) dx$. Поэтому функция Φ стремится к нулю при $L \rightarrow +\infty$. В другом предельном случае, когда $L \rightarrow 0$, функция Φ

также стремится к нулю. При фиксированном значении d_0/d_w существует оптимальное значение длины устройства, при котором достигается максимум функции Φ . Таким образом, для достижения максимальной эффективности энергопреобразования необходимо согласование размеров термоэлектрического преобразователя с размерами горелочного устройства. Из физических соображений ясно, что максимум эффективности устройства достигается в том случае, когда длина L участка канала, через который отводится тепло к термоэлементу, будет совпадать с характерной длиной падения температуры в стенках канала.

На рис. 5 представлены зависимости функции Φ от числа Пекле или безразмерного диаметра канала, рассчитанные при условии постоянства параметров χ и L . Постоянство параметров χ и L означает, что с изменением числа Пекле геометрические размеры термоэлектрического устройства меняются пропорционально диаметру канала (масштабируются). Как было отмечено выше, рециркуляция тепла по стенкам канала позволяет стабилизировать пламя в канале, диаметр которого меньше критического значения Pe_{cr} . Из рис. 5 видно, что существует оптимальное значение числа Пекле, при котором функция Φ достигает максимума. Оптимальные значения для различных значений d_0/d_w расположены примерно в окрестности $Pe \approx Pe_{cr}$. При уменьшении поперечных размеров канала абсолютные значения потока химической энергии топлива и электрической мощности, генерируемой устройством, уменьшаются, однако их отношение, характеризующее эффективность энергопреобразования, возрастает. Это объясняется

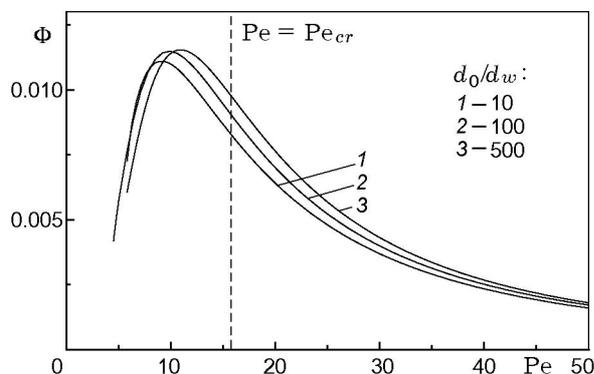


Рис. 5. Зависимости $\Phi(\text{Pe})$ при $\sigma = 0.136$, $\text{Nu} = 4$, $\lambda_g/\lambda_s = 10^{-3}$, $\chi/\mu = 0.1$, $N = 6.82$, $L = 500$

тем, что отношение потока тепла, поступающего в стенку канала от газа, к потоку химической энергии, поступающей вместе со свежей смесью, больше в узком канале, чем в широком. Кроме того, рециркуляция тепла по стенкам канала эффективнее именно в малоразмерных каналах. Поэтому в малоразмерных энергопреобразующих устройствах возможно более эффективное преобразование тепла от горения газа в электричество, чем в их крупномасштабных аналогах.

В общем случае, независимо от конструкции термоэлектрического преобразователя, можно выделить три основных следующих параметра, от которых зависит эффективность преобразования. Первый параметр характеризует интенсивность теплообмена между газом и твердой стенкой — $\Omega = \text{Nu}/\text{Pe}^2$. В задаче о пределах распространения пламени в канале этот параметр характеризовал интенсивность межфазного теплообмена и связан с теплотерями в стенке канала. Горение было возможно лишь в том случае, когда этот параметр превышал некоторое критическое значение. Вторым параметром — $\mu = \lambda_g d_0 / \lambda_s d_w$. Если теплопроводность или толщина стенок канала очень большие, так что $\mu \rightarrow 0$, то температура стенок близка к начальной температуре и регенерация тепла отсутствует. Регенерация тепла невозможна и в случае $\mu \rightarrow \infty$, когда толщина стенок канала становится очень малой. Параметр χ характеризует теплопередачу через внешнюю стенку канала и в случае, когда стенки канала изолированы от внешней среды, $\chi = 0$.

Расчет зависимости $\Phi_{\Omega, \chi}(\mu)$ показал, что для одного и того же состава смеси и раз-

мера термоэлектрического преобразователя L функция $\Phi_{\Omega, \chi}(\mu)$ максимальна примерно при $\mu \cong 0.5$. Здесь обозначение $\Phi_{\Omega, \chi}(\mu)$ соответствует однопараметрической зависимости $\Phi(\mu)$ при заданных значениях χ и Ω . Максимальное значение μ слабо зависит от значений χ и Ω . В случае $\mu \rightarrow \infty$ теплопроводность по стенкам канала вдоль направления движения газа становится незначительной и регенерация тепла практически отсутствует. Функция $\Phi_{\Omega, \chi}(\mu)$ при этом стремится к постоянной величине. Наличие максимума функции $\Phi_{\Omega, \chi}(\mu)$ показывает, что тепловая регенерация, в данном случае подогрев газа теплом от продуктов горения за счет переноса части тепла по теплопроводным стенкам канала, действительно способна повысить эффективность устройства. Заметим, что передача тепла по стенкам устройства является характерной особенностью малоразмерных устройств. Расчеты показали, что эффективность устройства существенно зависит от параметров χ и Ω . На рис. 6 построены линии уровня функции $\Phi(\chi, \Omega)$, рассчитанные для $\mu = 0.5$. Наличие острого максимума функции $\Phi(\chi, \Omega)$ показывает, что эффективность устройства может быть существенно увеличена при соответствующем согласовании параметров задачи.

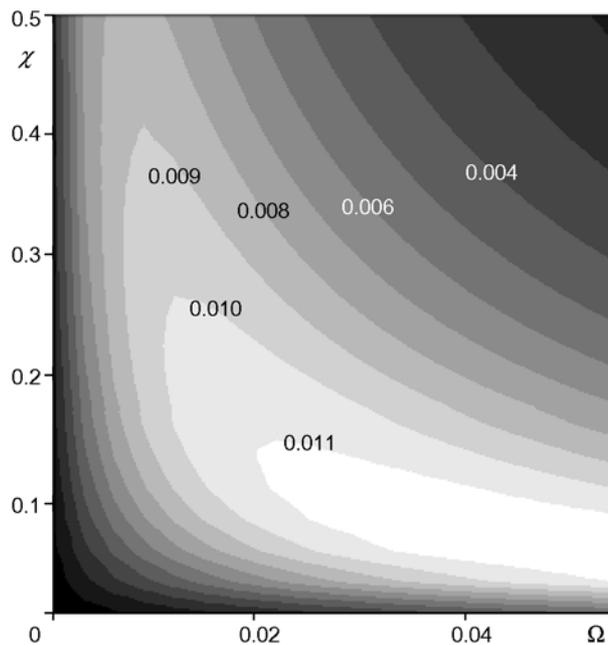


Рис. 6. Линии уровня функции $\Phi(\Omega, \chi)$ при $\sigma = 0.136$, $L = 500$, $\mu = 0.5$, $N = 6.82$, $\text{Nu} = 4$

Для примера оценим величину коэффициента Φ для термогенератора ТГК-2-2 [13]. Это устройство выпускалось в СССР в 1960-е годы и работало на керосине с расходом 40 г/ч, что соответствует мощности горелочного устройства 493 Вт. С учетом того, что вырабатываемая электрическая мощность составляла порядка 1 Вт, эффективность этого термогенератора (по расходу топлива) была примерно 0.2 %. Полагая, что добротность термоэлементов из константана и Zn—Sb равна $Z \approx 0.5 \times 10^{-3}$ К, а разница между адиабатической температурой продуктов горения керосина и начальной температурой составляет $T_b - T_0 \approx 1800$ К, из формулы (13) получаем следующую оценку: $\Phi \approx 0.0022$. В то же время из рис. 4 или рис. 5 видно, что максимальное значение Φ примерно в пять раз больше и может быть получено простым уменьшением геометрических размеров системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что в малоразмерных энергопреобразующих устройствах тепловая регенерация за счет теплопроводных стенок позволяет существенно увеличить эффективность системы. Для достижения максимальной эффективности энергопреобразования необходимо согласование параметров, характеризующих как теплофизические и термоэлектрические свойства системы, так и свойства горючей смеси. Рассматриваемая в этой статье термоэлектрическая система не является совершенной конструкцией. В практических устройствах для увеличения теплоотдачи от газа в термоэлемент можно поместить спай термопар непосредственно в горячий газ или использовать теплопередающие сетки с развитой поверхностью [14]. В то же время рассмотренная модель термоэлектрического преобразователя с горением газа позволила проиллюстрировать ряд положений, которые могут оказаться полезными при конструировании более совершенных устройств. Обнаружено, что наибольшая эффективность, как правило, достигается вблизи пределов существования пламени. Поэтому вопрос о пределах существования и устойчивости пламени в малоразмерных системах прямо связан с вопросами повышения эффективности устройства. Анализ процессов в модельной системе показал, что в малоразмерных энергопреобразующих устройствах возможно более эффективное преобразо-

вание тепла от горения газов в электричество, чем в их крупномасштабных аналогах.

В заключение отметим, что для увеличения генерации электрической мощности можно объединить микроустройства с высоким коэффициентом преобразования в модули. В этом случае, по-видимому, можно будет добиться высокой эффективности энергопреобразования и генерировать необходимую электрическую мощность.

Авторы благодарны В. К. Баяву (ИТПМ СО РАН) за ценные замечания и обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Epstein A. H., Senturia S. D., Al-Midani U.** Micro-heat engines, gas turbines and rocket engines — the MIT microengine Project. Paper 97-1773. 1997. P. 1–12. (Twenty-Eighth AIAA Fluid Dynamics Conf.).
2. **Fernandez-Pello A. C.** Micropower generation using combustion: issues and approaches // Proc. Combust. Inst. 2002. (29th Symp. on Combustion).
3. **Ronney P. D.** Gas-phase and catalytic combustion in heat-recirculating burners // Combust. Flame. 2003. V. 135. P. 421–439.
4. **Kim N. I., Kato S., Kataoka T., et al.** Flame stabilization and emission of small swiss-roll combustors as heaters // Combust. Flame. 2005. V. 141. P. 229–240.
5. **Lloyd S. A., Weinberg F. J.** A burner for mixtures of very low heat content // Nature. 1974. V. 251. P. 47–49.
6. **Замашников В. В.** Особенности горения пропано- и водородовоздушных смесей в узкой трубке // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 6. С. 14–25.
7. **Spalding D. B.** A theory of inflammability limits and flame-quenching // Proc. Roy. Soc. L. Ser. A. 1957. V. 240, N 1220. P. 83–100.
8. **Зельдович Я. Б.** Теория предела распространения тихого пламени // ЖЭТФ. 1941. Т. 11, вып. 1. С. 159–168.
9. **Zamashchikov V. V.** Experimental investigation of gas combustion regimes in narrow tubes // Combust. Flame. 1997. V. 108, N 3. P. 357–359.
10. **Замашников В. В., Минаев С. С.** Пределы распространения пламени в узком канале при фильтрации газа // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 1. С. 25–31.
11. **Norton D. G., Vlachos D. G.** Combustion characteristics and fame stability at the microscale: a CFD study of premixed methane/air mixtures // Chem. Eng. Sci. 2003. V. 58. P. 4871–4882.

12. **Ju Y., Xu B.** Theoretical and experimental studies on mesoscale flame propagation and extinction // Proc. Combust. Inst. 2005. V. 30. P. 2445–2453.
13. **Бернштейн А. С.** Термоэлектрические генераторы. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956.
14. **Анатычук Л. И.** Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев: Наук. думка, 1979.

Поступила в редакцию 4/IV 2006 г.
