

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ РАЗДЕЛЯЮЩИХСЯ ПЛАМЕН В КАНАЛЕ С ПОДОГРЕВОМ

А. Фан^{1,2}, С. С. Минаев³, Е. В. Серещенко³, Ю. Цубой¹, Х. Осибе¹,
Х. Накамура¹, К. Марута¹

¹Институт механики сплошной среды, Университет Тохоку, 980-8577 Сендай, Япония
faw@edyn.ifs.tohoku.ac.jp

²Научно-технический университет Хуачжун, 430070 Ухан, Китай

³Институт теоретической и прикладной механики СО РАН им. С. А. Христиановича, 630090 Новосибирск

В рамках теплодиффузионной двухкомпонентной модели предсказано существование двух фронтов реакции при горении газа в микроканале с подогревом. Показано, что после самовоспламенения пламя разделяется на два фронта с разной светимостью. Один фронт распространяется против потока, другой по потоку, и через некоторое время обе волны горения затухают. После некоторой задержки процесс повторяется и происходит новое самовоспламенение от горячих стенок. Показано, что общепринятая модель с бесконечно узкой зоной химической реакции, не учитывающая явную зависимость скорости реакции от концентрации, не описывает данное явление. С помощью скоростной видеосъемки процесса горения пропановоздушной смеси получены экспериментальные данные, которые подтверждают возможность образования двух фронтов реакции. Кроме того, эксперимент показал возможность образования трех пиков реакции и двух делений волны горения за один цикл периодического воспламенения и затухания.

Ключевые слова: микрогорение, разделяющиеся пламена, периодическое воспламенение и затухание.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возрос интерес к созданию миниатюрных энергопреобразующих устройств, представляющих собой комбинацию малоразмерной камеры сгорания и устройства, преобразующего тепло горения в электрическую энергию. Такие устройства, использующие тепло сгорания углеводородных топлив, потенциально могли бы иметь большую энергоемкость по сравнению с традиционными электрическими аккумуляторами при одинаковых массе и размерах [1, 2]. С уменьшением размера камеры сгорания возрастают теплопотери из зоны горения и организация устойчивого горения становится проблематичной. Известно, что горение газа невозможно, если диаметр канала меньше критической величины [3], которая уменьшается при увеличении температуры стенок. Поэтому одним из возможных пу-

тей организации горения в микроканалах может быть повышение температуры стенок горелочного устройства за счет тепловой рециркуляции, как, например, в горелке «Swiss roll» [4, 5].

Основные механизмы горения газов в системах с рециркуляцией тепла могут быть выяснены из исследования горения газов в узком канале с нагретыми стенками. Недавно выполненные эксперименты по горению газа в микроканалах с продольным градиентом температуры в стенках обнаружили интересные периодические процессы [6, 7]. В этих экспериментах поперечный размер канала был меньше критического диаметра, определенного для окружающей температуры. Один из таких процессов наблюдался в нагретом микроканале и был назван FREI (flame repetitive extinction ignition), или пламя с периодическим воспламенением и затуханием [7]. Модель этого явления предложена в работе [8], в которой в рамках диффузионно-тепловой модели получено одномерное нелинейное эволюционное уравнение для фронта пламени, распространяющегося в канале с продольным градиентом температуры в стенках. Нелинейная модель описыва-

Aiwu Fan^{1,2}, Yosuke Tsuboi¹, Hiroshi Oshibe¹,
Hisashi Nakamura¹, Kaoru Maruta¹.

¹Institute of Fluid Science, Tohoku University, 980-8577 Sendai, Japan.

²School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 430074 Wuhan, China.

ла стабилизацию пламени, нелинейные осцилляции и периодическое воспламенение и погасание пламени. Численное моделирование, выполненное в работах [6, 9], также показало возможность периодического затухания и воспламенения при горении газа в микротрубке с заданным профилем температуры. Кроме того, явление периодического воспламенения-затухания наблюдалось также при горении газа в изогнутом канале [10] и было найдено в двумерном численном исследовании горения газа в прямом микроканале [11].

Исследование горения газа в прямой трубке с градиентом температуры [7] было расширено на случай радиальной геометрии [12]. Наблюдения показали, что в этой системе существует большое разнообразие пространственных структур пламени, таких как устойчивое и неустойчивое цилиндрическое пламя, структуры, напоминающие турбину Пелтона с одной, двумя или множеством лопаток, блуждающее пламя, вращающиеся пламена с тремя ветвями, спиральное пламя и др. [13]. В последующих работах были предприняты попытки численного моделирования этих структур, однако некоторые пространственные структуры не удалось воспроизвести в рамках однокомпонентной диффузионно-тепловой модели с одноступенчатой химической реакцией, например спиральное пламя. Предполагая, что вращающиеся структуры, такие как спирали, могут быть тесно связаны с явлением периодического воспламенения-погасания (явления FREI), мы провели специальные эксперименты в прямой трубке и выполнили численное моделирование с тем, чтобы пролить свет на возможный механизм образования спирального пламени и других необычных структур. Недавно в работе [14] были получены некоторые предварительные успешные результаты численного моделирования вращающихся структур в радиальном канале. В этом исследовании, так же как и в работе [14], мы используем более точную аппроксимацию скорости реакции от концентраций топлива и окислителя [15]. Далее следуют описание теоретического моделирования и сравнение предсказаний теории с экспериментом.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В модели используются предположение об одностадийной химической реакции с аррениусовской зависимостью от температуры и не за-

висящие от температуры коэффициенты переноса, а также приближение постоянной плотности газа. Эти предположения вполне подходят для качественного анализа основных механизмов распространения пламени в микроканале с продольным градиентом температуры в стенках. Изменения температуры газа T , массовой доли горючего Y_f и окислителя Y_{ox} описываются уравнениями:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_0 \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{2\alpha}{d} (T - \theta) + QW(Y_{ox}, Y_f, T), \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_{ox})}{\partial t} + v_0 \frac{\partial(\rho Y_{ox})}{\partial x} = D \frac{\partial^2(\rho Y_{ox})}{\partial x^2} - \nu W(Y_{ox}, Y_f, T), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_f)}{\partial t} + v_0 \frac{\partial(\rho Y_f)}{\partial x} = D \frac{\partial^2(\rho Y_f)}{\partial x^2} - \nu W(Y_{ox}, Y_f, T), \quad (3)$$

где

$$W(Y_{ox}, Y_f, T) = \rho A Y_{ox}^a Y_f^b \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (4)$$

В уравнениях (1)–(4) ρ — плотность, c_p — теплоемкость при постоянном давлении, t — время, λ — теплопроводность, α — коэффициент теплообмена, v_0 — средняя скорость газа, d — внутренний диаметр трубки, θ — температура стенки, Q — теплота реакции, W — скорость химической реакции, D — коэффициент диффузии газа, ν — отношение стехиометрических коэффициентов, A — предэкспоненциальный фактор скорости химической реакции, E — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная, a, b — коэффициенты в степенной зависимости скорости реакции от массовых долей окислителя и горючего.

Были выбраны следующие значения параметров: $A = 5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$, $E/R = 15\,042 \text{ К}$, $a = 1.65$, $b = 0.1$, $\rho = 1.3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_p = 1\,000 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\lambda = 0.026 \text{ Вт} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $d = 2.0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $D = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $Q/c_p = 33\,000 \text{ К}$ и $\nu = 3.62$, которые примерно соответствуют стехиометрической пропановоздушной смеси. Коэффициент α в уравнении (1) связан

с числом Нуссельта соотношением $Nu = \alpha d / \lambda$. В дальнейшем полагаем $Nu = 4$, что соответствует установившемуся ламинарному течению газа в канале.

Распределение температуры в стенках трубки считается не зависящим от времени и задается формулой

$$\theta = T_0 + (\Theta_1 - T_0) \frac{\exp(\eta x) - 1}{\exp(\eta l) - 1} \quad \text{при } 0 < x < l, \quad (5)$$

$$\theta = \Theta_1 \quad \text{при } l < x < L,$$

где L — размер расчетной области. Выбраны значения $l = 0.04$ м, $L = 0.065$ м, $\eta = 70 \text{ м}^{-1}$ и $\Theta_1 = 1150$ К, которые примерно соответствуют экспериментальному профилю. Расчетная область задавалась в интервале $0 < x < L$.

Граничные условия на входе ($x = 0$) имеют вид

$$T = T_0, \quad Y_f = Y_f^0, \quad Y_{ox} = Y_{ox}^0, \quad (6)$$

в то время как на выходе ($x = L$) предполагались нулевые потоки для Y_{ox} , Y_f и T :

$$\nabla T = \nabla Y_f = \nabla Y_{ox} = 0. \quad (7)$$

Начальные распределения температуры и концентрации были следующими:

$$\begin{aligned} T &= T_0 \quad \text{при } 0 < x < x_f, \\ T &= T_1 \quad \text{при } x_f < x < L; \\ Y_{f,ox} &= Y_{f,ox}^0 \quad \text{при } 0 < x < 1.1x_f, \\ Y_{f,ox} &= 0 \quad \text{при } 1.1x_f < x < L, \end{aligned} \quad (8)$$

где $x_f = 0.035$ м и $T_1 = 1300$ К. Численное моделирование нестационарных уравнений (1)–(3) выполнялось по неявной конечно-разностной схеме. Корректность метода проверялась вариацией числа узлов сетки и шагов по времени. Средняя скорость течения газа во всех расчетах выбиралась равной $v_0 = 20$ см/с, шаг по времени составлял $3.25 \cdot 10^{-7}$ с.

Рассмотрим изменение скорости реакции в различные моменты времени в процессе периодического воспламенения и погасания пламени. Пространственное распределение скорости реакции в трубке показано на рис. 1 через каждые 1500 шагов по времени или через 0.4875 мс. После затухания пламени свежая смесь заполняет горячую часть трубки, где происходит зажигание из-за нагрева газа стенками трубки.

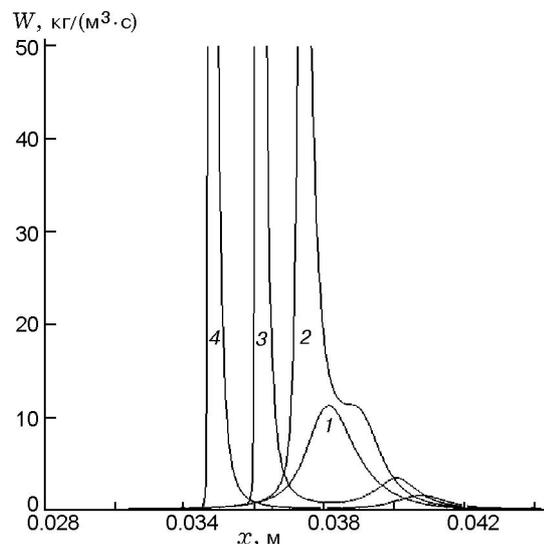


Рис. 1. Профили скорости реакции в последовательные моменты времени после воспламенения (временной интервал 0.4875 мс)

Как видно из рис. 1, после воспламенения формируются два пика химической реакции, которые соответствуют двум фронтам пламени, распространяющимся в противоположные стороны. Большой пик соответствовал обычному пламени, распространяющемуся против потока, а более слабый пик — фронту горения, распространяющемуся по потоку. В течение последующей эволюции оба фронта исчезали, но по разным причинам. Затухание обычного пламени происходило из-за теплопотерь после достижения им холодной части трубки, в то время как затухание слабого фронта реакции было вызвано расходом горючего в горячей части трубки.

Эволюция массовой доли топлива приведена на рис. 2 в те же самые моменты времени, что и на рис. 1. На первый взгляд, кажется необычным, что расходование горючего начинается в средней части, а не на переднем крае профиля массовой доли горючего, заполняющего область, окруженную горячими стенками. Это можно объяснить следующим образом. Обычно считается, что скорость реакции в основном зависит от температуры и ее максимум соответствует максимальной температуре газа. На самом деле, максимум скорости реакции надо определять как максимум функции, зависящей не только от температуры, но и от массовых долей окислителя и горючего. Принимая во внимание этот факт, легко по-

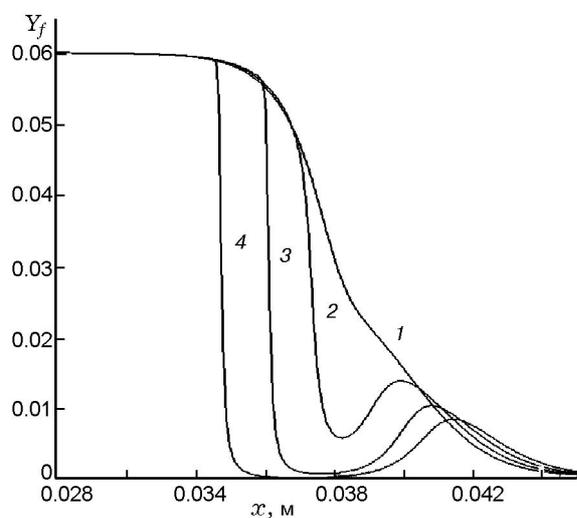


Рис. 2. Профили массовой доли топлива в последовательные моменты времени после воспламенения (временной интервал 0.4875 мс)

нять, что максимум скорости химической реакции в момент воспламенения будет расположен не на передней части профиля концентрации, а в некоторой точке, находящейся вверху по течению газа, где концентрация горючего больше. Рис. 1 и 2 показывают, что обе волны горения воспламеняются в одной точке и могут быть названы разделяющимися пламенами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Были проведены специальные эксперименты с горением газа в прямой трубке с целью обнаружить явление разделяющихся пламен. На рис. 3 показана схема экспериментов, которые выполнялись в предыдущих исследованиях [7].

Средняя часть микроканала с внутренним диаметром 2 мм нагревалась с помощью внешнего источника тепла. После того, как температурный профиль в стенках канала достигал своего стационарного значения, стехиометрическая пропановоздушная смесь подавалась на вход микроканала. Максимальная температура стенок составляла 1135 К, что обеспечивало самовоспламенение стехиометрической пропановоздушной смеси внутри трубки. Для регистрации нестационарного поведения пламени использовалась скоростная цифровая камера с усилителем изображения и частотой съемки 4000 кадр/с. В случае, когда скорость потока газа на входе была примерно $20.0 \div 30.0$ см/с, регистрировались разделяющиеся пламена.

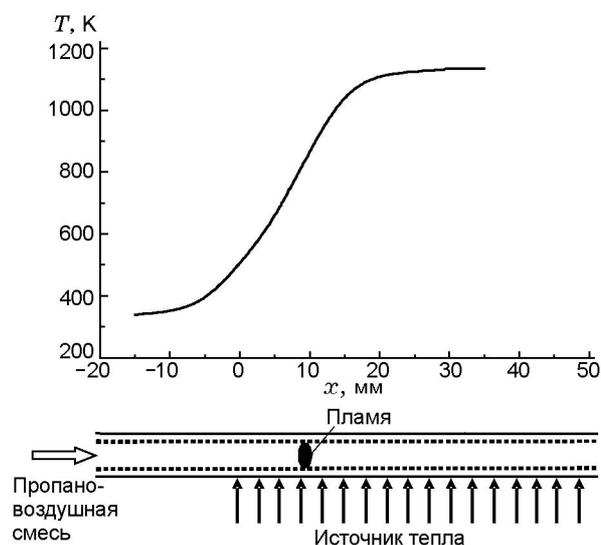


Рис. 3. Схема эксперимента с нагретой кварцевой трубкой и температурный профиль стенок трубки (начало координат расположено в точке, совпадающей с координатой левого конца нагревателя)

Рис. 4 представляет динамику развития пламен после самовоспламенения. Кадры *a*, *b* показывают, что самовоспламенение происходит в некоторой точке в горячей части трубки и светящаяся область движется против потока. Вскоре после этого длина светящейся области почти удваивается и область разделяется на две части, как это видно на кадрах *c* и *d*, место деления выделено стрелкой. Светящаяся область слева, соответствующая обычному пламени, ярче, чем область справа, соответствующая менее интенсивному второму пламени. Эти снимки подтверждают одновременное существование двух пиков реакции, предсказанное теоретическими расчетами, приведенными выше. Обычное пламя распространялось против потока, а слабосветящееся пламя — вниз по потоку (см. рис. 4, *e-g*). Скорость распространения нормального пламени была выше скорости распространения слабосветящегося пламени. Далее обычное пламя начинало снова распадаться, точка, где начинался распад, показана стрелкой на рис. 4, *h*. На кадрах *i*, *j* видно, что три пика реакции существовали одновременно. Обычное пламя светилось ярче, чем две другие волны реакции. (Заметим, что для регистрации двух низкосветящихся областей яркость и контрастность изображения были увеличены на 60 %, в то время как другие кадры были получены при усилении яркости и

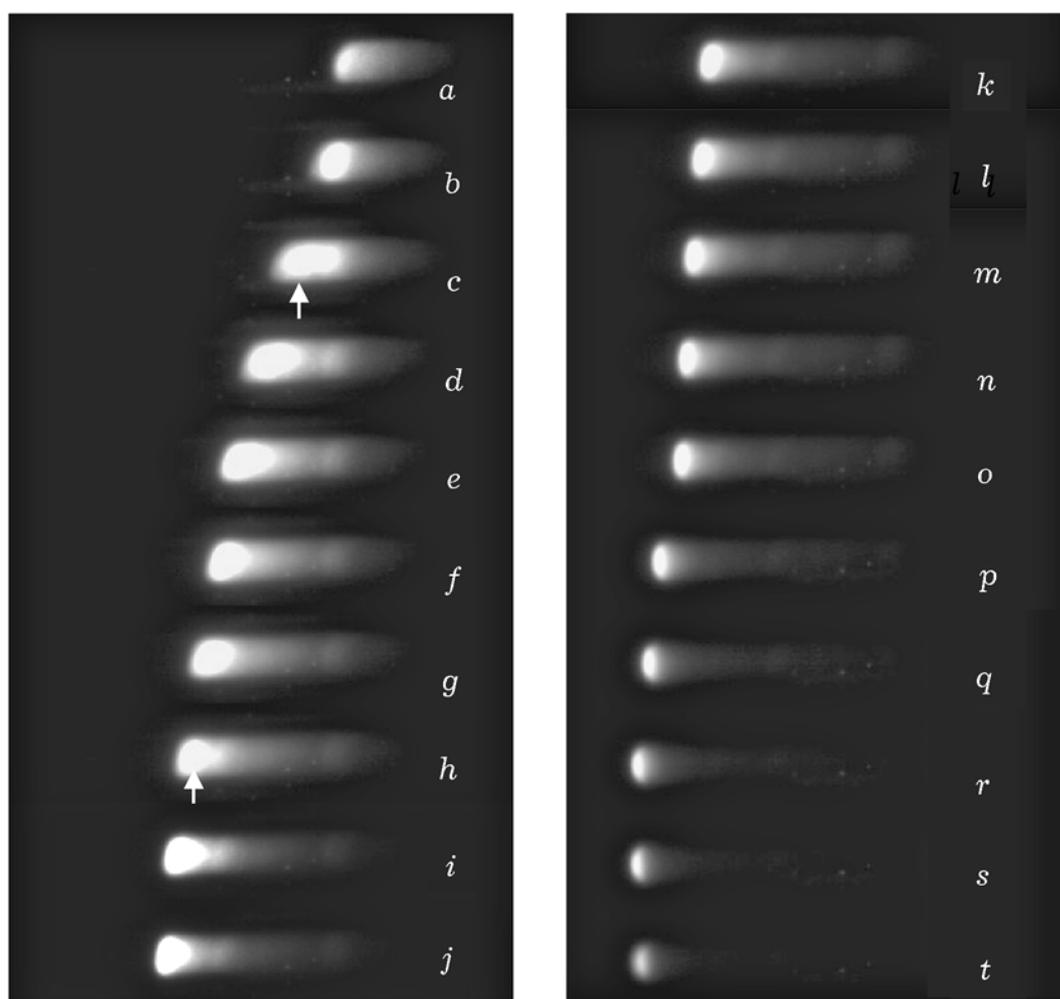


Рис. 4. Эволюция волн горения стехиометрической пропановоздушной смеси после зажигания: изображения получены с помощью цифровой скоростной камеры с усилением интенсивности с частотой 4000 кадр/с; поток газа движется слева направо со средней скоростью на входе 30 см/с

контрастности на 50 %.) После этого обе низкосветящиеся области становились темнее и исчезали, что иллюстрируют кадры *k–o*. В это же время светящаяся область, соответствующая обычному пламени, становилась тоньше и темнее и скорость ее распространения уменьшалась. Под конец процесса (см. рис. 4, *r–t*) положение пламени почти не менялось и оно затухало. После некоторой задержки начиналось новое самовоспламенение, далее процесс повторялся.

ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что распространение волны реакции по горючей смеси газов в ламинарном по-

токе характеризуется нормальной скоростью. Однако данное исследование показало, что при периодическом самовоспламенении может существовать несколько волн химических реакций. Численные расчеты горения водородно-воздушной смеси в нагретом микроканале, выполненные в работе [11], также свидетельствуют, что динамическое поведение волн горения совпадает с тем, что описано в данной работе. В то же время описание процесса FREL, выполненное в работе [16] в рамках широко применяемой в аналитических исследованиях модели с бесконечно узкой зоной химической реакции, не способно моделировать образование двух фронтов горения. По-видимому, образование разделяющихся пламен будет проявлять

себя в случае сильной зависимости скорости химической реакции от концентраций химических реагентов. Мы предполагаем, что именно явление разделяющихся пламен связано с образованием различных вращающихся структур в радиальном канале [12–14], механизм формирования которых не ясен до сих пор.

Хотя формирование двух фронтов химической реакции и было качественно описано в рамках модели с одностадийной химической реакцией, образование трех пиков реакции, наблюдаемых в эксперименте, не охватывается этой моделью. Поэтому численное исследование с детальной кинетикой, например, по модели GRI-Mech 3.0 необходимо для понимания деталей явления FREL.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано динамическое поведение двух волн химической реакции в нагретом микроканале. Теоретическое моделирование выполнено в рамках диффузионно-тепловой модели с двухкомпонентной одноступенчатой химической реакцией. Показано, что после самовоспламенения пламя разделяется на два фронта с разной светимостью. Один фронт распространяется против потока, а другой по потоку, и через некоторое время обе волны горения затухают. Интересно, что если использовать представление о нормальной скорости пламени, то первый фронт мог бы характеризоваться положительным значением нормальной скорости, а второй, с более низкой интенсивностью, — отрицательными значениями. После некоторой задержки процесс повторялся и происходило новое самовоспламенение от горячих стенок. Было показано, что общепринятая модель с бесконечно узкой зоной химической реакции, не учитывающая явную зависимость скорости реакции от концентрации, не описывает данное явление. Теоретические предсказания возможности существования разделяющихся пламен были подтверждены экспериментально. В то же время сравнение результатов теории и экспериментов показало, что для более детального описания явления разделения пламени в нагретом канале необходимо использовать более сложные кинетические модели горения.

Авторы благодарны господину С. Хасегава за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fernandez-Pello A. C.** Micropower generation using combustion: issues and approaches // *Proc. Combust. Inst.* — 2002. — V. 29. — P. 883–899. — (29th Symp. (Intern.) on Combustion).
2. **Dunn-Rankin D., Leal E. M., Walther D. C.** Personal power systems // *Progress in Energy and Combust. Sci.* — 2005. — V. 31. — P. 422–465.
3. **Зельдович Я. Б.** Теория предела распространения тихого пламени // *ЖЭТФ.* — 1941. — Т. 11, вып. 1. — С. 159–168.
4. **Lloyd S. A., Weinberg F. J.** A burner for mixtures of very low heat content // *Nature.* — 1974. — V. 251. — P. 47–49.
5. **Sitzki L., Borer K., Wussow S., Schuster E., Ronney P. D., Cohen A.** Combustion in microscale heat-recirculating burners // 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 8–11, 2001. — AIAA Paper. — 2001. — N 2001-1087.
6. **Fateev G. A., Rabinovich O. S., Silenkov O. S.** Oscillatory combustion of a gas mixture blow through a porous medium or a narrow tube // *Proc. Combust. Inst.* — 1998. — V. 27. — P. 3147–3153.
7. **Марута К., Парк Дж. К., Ох К. С., Фуджимори Т., Минаев С. С., Фурсенко Р. В.** Особенности механизма распространения пламени в богатых смесях водород — пропан — воздух // *Физика горения и взрыва.* — 2004. — Т. 40, № 3. — С. 21–29.
8. **Minaev S., Maruta K., Fursenko R.** Nonlinear dynamics of flame in a narrow channel with a temperature gradient // *Combust. Theory Model.* — 2007. — V. 11. — P. 187–203.
9. **Jackson T. L., Buckmaster J., Lu Z., Kyritsis D. C., Massa L.** Flames in narrow circular tubes // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31. — P. 955–962. — (31th Symp. (Intern.) on Combustion).
10. **Richecoeur F., Kyritsis D. C.** Experimental study of flame stabilization in low Reynolds and Dean number flows in curved mesoscale ducts // *Proc. Combust. Inst.* — 2005. — V. 30. — P. 2419–2427. — (30th Symp. (Intern.) on Combustion).
11. **Pizza G., Frouzakis C. E., Mantzaras J., Tomboulides A. G., Boulouchos K.** Dynamics of premixed hydrogen/air flames in microchannels // *Combust. Flame.* — 2008. — V. 152. — P. 433–450.
12. **Kumar S., Maruta K., Minaev S.** Pattern formation of flames in radial microchannels with lean methane-air mixtures // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31. — P. 3161–3268. — (31th Symp. (Intern.) on Combustion).
13. **Fan A. W., Minaev S., Kumar S., Liu W., Maruta K.** Regime diagrams and characteristics of flame patterns in radial microchannels with

- temperature gradients // *Combust. Flame.* — 2008. — V. 153. — P. 479–489.
14. **Fan A. W., Minaev S., Sereshchenko E., Fursenko R., Kumar S., Liu W., Maruta K.** Experimental and numerical investigations of flame pattern formations in a radial microchannel // *Proc. Combust. Inst.* — 2009. — V. 32. — P. 3059–3066. — (32nd Symp. (Intern.) on Combustion).
15. **Westbrook C. K., Dryer F. L.** Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames // *Combust. Sci. Technol.* — 1981. — V. 27. — P. 31–43.
16. **Buckmaster J.** The structure and stability of laminar flame // *Annu. Rev. Fluid Mech.* — 1993. — V. 25. — P. 21–53.

*Поступила в редакцию 24/VI 2008 г.,
в окончательном варианте — 18/XI 2008 г.*
