

РАЗДЕЛЯЮЩИЕСЯ ПЛАМЕНА В УЗКОМ КАНАЛЕ С ГРАДИЕНТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ В СТЕНКАХ

С. С. Минаев¹, Е. В. Серещенко¹, Р. В. Фурсенко¹, А. Фан², К. Марута²

¹Институт теоретической и прикладной механики СО РАН им. С. А. Христиановича, 630090 Новосибирск
minaev@itam.nsc.ru

²Институт механики сплошной среды, Университет Тохоку, 980-8577 Сендай, Япония

Показана возможность одновременного образования двух фронтов химической реакции при нестационарном горении газа в микроканале с градиентом температуры в стенках. Рассмотрены случаи горения в прямой трубке и в зазоре между двумя дисками при радиальной подаче топлива. В обоих случаях характерный поперечный размер канала был меньше критического диаметра, определенного для температуры окружающей среды, и горение газа происходило в области, где температура стенок превышала температуру окружающей среды. Численное исследование процессов периодического воспламенения и затухания пламени (FREI) продемонстрировало возможность одновременного образования двух фронтов химической реакции в горячей области канала. Один фронт соответствовал нормальному пламени, распространяющемуся вверх по потоку от горячей к холодной части канала, а другой фронт двигался по потоку и затухал по мере выгорания топлива. На основе данного исследования предложен новый механизм воспламенения и неполного сгорания горючей смеси в микросистемах.

Ключевые слова: микрогорение, неустойчивость, воспламенение, недогорание смеси.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время знания о динамическом поведении фронтов химических реакций в микроканалах недостаточно, чтобы удовлетворить требованиям, предъявляемым в микротехнологиях, где возможна, например, комбинация экзотермических и эндотермических реакций, как в случае процесса с горением и катализом [1]. В этих устройствах горение используется в качестве источника тепловой энергии. Основным механизмом для поддержания горения в малоразмерной системе является подогрев свежей смеси, поступающей в камеру сгорания. Аналогичный механизм реализуется в пористых средах, где пламя может стабилизироваться в микроканалах, даже если размеры микроканалов существенно меньше критического диаметра, определенного по начальной температуре. Горение в этом случае возможно при условии, что газовая фаза окружена стенками, температура которых превышает температуру окружающей среды. Поэтому исследования горения газа в микроканалах с градиентом температуры необходимы для понимания процессов как в микросистемах с регенерацией

тепла, где подогрев горючей смеси газов происходит за счет тепла отходящих продуктов горения, так и для развития новых технологий, в которых используется горение газов в пористых средах.

В теоретической [2] и экспериментальной работах [3] впервые было показано, что горение газа в микроканале может осуществляться за счет регенерации тепла по теплопроводящим стенкам канала. Теоретические и экспериментальные исследования горения газа в системе с противоточным теплообменом [4, 5] также показали возможность горения газа в узких каналах диаметрами меньше критического размера, определенного по температуре окружающей среды. В этих системах горючая смесь подогревалась через теплопроводящие стенки каналов и пламя стабилизировалось в горячей части канала, где имеется градиент температуры в стенках. Для выяснения механизма стабилизации пламени в микросистемах с регенерацией тепла были выполнены теоретические и экспериментальные исследования горения газов в канале с заданным градиентом температуры в стенках [6–8]. В более ранней работе [9], посвященной моделированию процессов горения в пористых средах, осцилляции пламени были обнаружены в модельной системе, пред-

Aiwu Fan, Kaoru Maruta.
Institute of Fluid Science, Tohoku University, 980-8577
Sendai, Japan.

ставляющей собой узкий канал с нагретыми стенками. В работе [6] в зависимости от расхода газа было обнаружено существование различных стационарных режимов горения, в том числе режим, характеризующийся очень малым расходом газа, а также колебания пламени и режим повторяющегося воспламенения и погасания пламени, иначе — режим FREI (flame repetitive extinction ignition). Малые размеры канала, в котором происходило горение, позволяли создавать почти однородное распределение температуры в поперечном сечении. Эксперименты показали, что градиент температуры в стенках канала, который создавался внешним источником тепла, оставался практически постоянным как при горении газа внутри канала, так и без горения. Эти наблюдения делают перспективным использование микроканала с градиентом температуры для изучения структуры пламени и проверки существующих моделей с детальной кинетикой химических реакций. Данная работа посвящена моделированию процесса периодического воспламенения и затухания пламени в микроканале с градиентом температуры.

МОДЕЛЬ

В модели нестационарного распространения волн горения предполагается, что плотность газа и его теплофизические характеристики не зависят от температуры. Рассматривались случаи горения газа в радиальном канале (рис. 1, *а*) и прямой трубке (рис. 1, *б*). Для простоты считалось, что процесс горения описывается одностадийной реакцией. В дан-

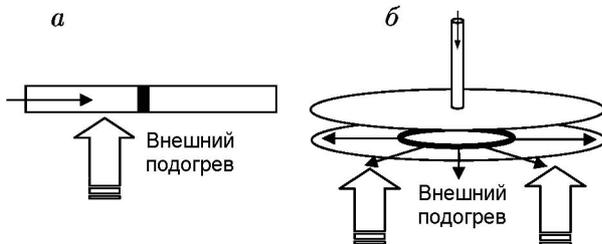


Рис. 1. Схема горения в прямой трубке (*а*) и в радиальном канале (*б*):

толстой линией обозначено пламя, стрелками — направление движения потока газа; *а* — слева холодная часть трубки, справа — горячая; *б* — наибольшая температура достигается на периферии дисков, центральная часть с подающей трубкой имеет пониженную температуру

ной модели распределения температуры газа T , массовых долей топлива Y_f и окислителя Y_{ox} описываются уравнениями:

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

$$\frac{\partial(\rho Y_{ox})}{\partial t} + (\mathbf{V}, \nabla)(\rho Y_{ox}) = D\Delta(\rho Y_{ox}) - \nu W(Y_{ox}, Y_f, T), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_f)}{\partial t} + (\mathbf{V}, \nabla)(\rho Y_f) = D\Delta(\rho Y_f) - W(Y_{ox}, Y_f, T). \quad (3)$$

Здесь

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

— скорость химической реакции, ρ — плотность, c_p — теплоемкость при постоянном давлении, t — время, λ — теплопроводность, α — коэффициент теплообмена, θ — температура стенки, Q — теплота реакции, \mathbf{V} — скорость газа, D — коэффициент диффузии газа, ν — отношение стехиометрических коэффициентов, A — предэкспоненциальный фактор скорости химической реакции, E — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная. В данной работе $A = 2.5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$, $E/R = 15042 \text{ К}$, $a = 0.1$, $b = 1.5$, $\rho = 1.2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_p = 2200 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\lambda = 0.07 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $D = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $Q/c_p = 35000 \text{ К}$ и $\nu = 3.98$, что примерно соответствует случаю метановоздушной смеси. В уравнении (1) коэффициент теплообмена связан с числом Нуссельта: $\text{Nu} = \alpha d / \lambda$, где d — внутренний радиус трубки или расстояние между дисками в радиальном канале. В расчетах использовались значения $d = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ в случае трубки и $d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ в случае радиального канала. Выбранные значения расстояния были меньше критических размеров каналов для стехиометрической метановоздушной смеси при температуре окружающей среды. Для простоты взято значение $\text{Nu} = 4$ как для прямого, так и для радиального канала. Чтобы отличать две геометрические конфигурации, мы

использовали две пространственные переменные r и x , которые соответствуют радиусу в полярных координатах в случае радиального канала и координате вдоль оси, направленной по потоку газа, в случае прямой трубки. Конвективные и диффузионные слагаемые в уравнениях (1)–(3) в этих переменных выглядят следующим образом:

$$(\mathbf{V}, \nabla) = \frac{G}{r} \frac{\partial}{\partial r}, \quad \Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) \quad (5)$$

в случае радиального канала и

$$(\mathbf{V}, \nabla) = v_0 \frac{\partial}{\partial x}, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad (6)$$

в случае прямой трубки. Здесь величина $G = r_0 v_{in}$ пропорциональна расходу газа, r_0 — радиус подающей трубки, v_{in} — радиальная скорость газа на выходе из подающей трубки, расположенной на оси симметрии, v_0 — средняя скорость газа.

Областью вычисления были отрезок $0 < x < L$ (прямая трубка) и кольцо $r_0 < r < R_0$ (радиальный канал). Предполагалось, что распределение температуры в стенках трубки не меняется со временем и описывается выражением

$$\theta = T_0 + (\Theta_1 - T_0) \frac{\exp(\eta x) - 1}{\exp(\eta l) - 1} \quad \text{при } 0 < x < l, \\ \theta = \Theta_1 \quad \text{при } l < x < L, \quad (7)$$

где L — размер расчетной области. Использовались следующие значения параметров: $l = 0.05$ м, $L = 0.065$ м, $\eta = 100$ м⁻¹ и $\Theta_1 = 1000$ К, что примерно соответствует экспериментальному профилю [6]. Распределение температуры в стенках радиального канала описывалось формулами

$$\theta = T_0 + (\Theta_2 - T_0) \frac{r - r_0}{r_1 - r_0} \quad \text{при } r_0 < x < r_1, \\ \theta = \Theta_2 \quad \text{при } r_1 < x < R_0, \quad (8)$$

где $r_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $r_1 = 0.025$ м, $R_0 = 0.04$ м и $\Theta_2 = 1000$ К, что приближенно совпадает с экспериментальным профилем [10]. Граничные условия имеют следующий вид:

на входе ($x = 0$, $r = r_0$)

$$T = T_0, \quad Y_f = Y_f^0, \quad Y_0 = Y_0^0, \quad (9)$$

на выходе ($x = L$, $r = R_0$)

$$\nabla T = \nabla Y_f = \nabla Y_0 = 0. \quad (10)$$

ОБРАЗОВАНИЕ ДВУХ ФРОНТОВ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ В ПРОЦЕССЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ПОГАСАНИЯ

Экспериментальные исследования горения газа в прямой трубке и в зазоре между двумя дисками с радиальной подачей горючей смеси показали, что стабильное горение наблюдается при больших и малых массовых расходах газа [6–8]. В этих экспериментах были определены области устойчивого и неустойчивого горения в зависимости от расхода газа. При горении газа в трубке обнаружен режим периодического зажигания и затухания пламени (режим FREI) [6–8], который наблюдался в некотором диапазоне средних по величине расходов газа. В радиальном канале также наблюдались устойчивые режимы горения при больших значениях расхода газа, а при меньших значениях горение сопровождалось образованием различных нестационарных конфигураций пламени, иногда принимающих вид вращающихся спиралей или вращающихся структур, напоминающих лопасти турбины [10, 11]. Механизм периодического зажигания и затухания пламени в прямой трубке был описан в работах [7, 8] в рамках одномерной модели. Попытка описания двумерных структур в радиальном канале сделана в работе [12] в рамках слабой нелинейной модели фронта пламени. Эти теоретические исследования выполнены в рамках однокомпонентной диффузионно-тепловой модели. Несмотря на качественное совпадение основных результатов теории и эксперимента, некоторые важные детали процесса воспламенения не могли быть получены в рамках этой простой модели.

В данной работе процесс воспламенения и затухания пламени исследовался численно в рамках двухкомпонентной диффузионно-тепловой модели (1)–(3). В работах [7, 12] были определены параметры расходов, при которых наблюдается неустойчивое горение. Из решения стационарной задачи в рамках однокомпонентной модели горения получены зависимости положения фронта пламени от расхода газа, которые имели вид S-образной кривой. На рис. 2 приведена типичная зависимость безразмерного радиуса фронта пламени от величины G , пропорциональной расходу газа ($G = v_{in} r_0$) [12]. В работе [7] показано, что средняя часть S-образной кривой между двумя точками поворота соответствует неустойчивой ветви и в этом случае может возникнуть явление пери-

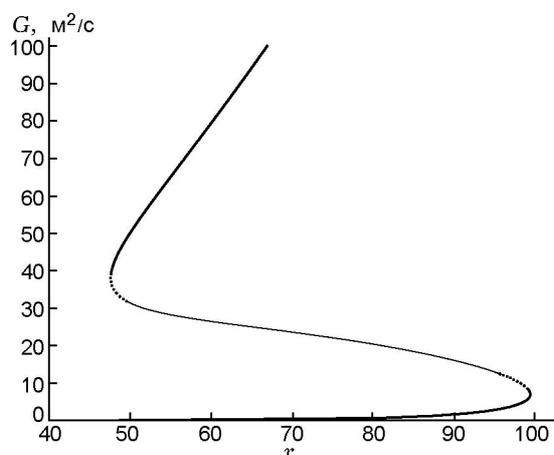


Рис. 2. Зависимость безразмерного радиуса фронта пламени от параметра G , пропорционального расходу газа [11]

одического воспламенения и погасания пламени. Эти результаты позволили оценить значения скорости потока для выполнения численного моделирования системы (1)–(3).

Численное моделирование выполнялось в рамках явной конечно-разностной схемы. Корректность расчетов проверялась с помощью изменения размера пространственной сетки и шагов по времени. Число узлов по пространству равнялось 2000. Начальные распределения температуры и концентрации в случае прямой трубки были следующими:

$$\begin{aligned}
 T &= T_0 && \text{при } 0 < x < x_f, \\
 T &= T_1 && \text{при } x_f < x < L; \\
 Y_{f,ox} &= Y_{f,ox}^0 && \text{при } 0 < x < 1.1x_f, \\
 Y_{f,ox} &= 0 && \text{при } 1.1x_f < x < L,
 \end{aligned} \quad (11)$$

где $x_f = 0.035$ м и $T_1 = 1300$ К.

На рис. 3 показана эволюция пространственного распределения скорости химической реакции вдоль оси прямой трубки с момента воспламенения. Последовательные профили скорости реакции приведены с интервалом, который составлял 1000 шагов по времени. Средняя скорость потока стехиометрической газовой смеси $v_0 = 20$ см/с, шаг по времени $3.25 \cdot 10^{-7}$ с. Для стехиометрической смеси $Y_f^0 = 0.055$, $Y_{ox}^0 = 0.219$. После инициирования горения пламя распространялось против потока, поскольку нормальная скорость смеси была выше скорости несгоревшей смеси, и затем затухало в холодной части трубки, расположен-

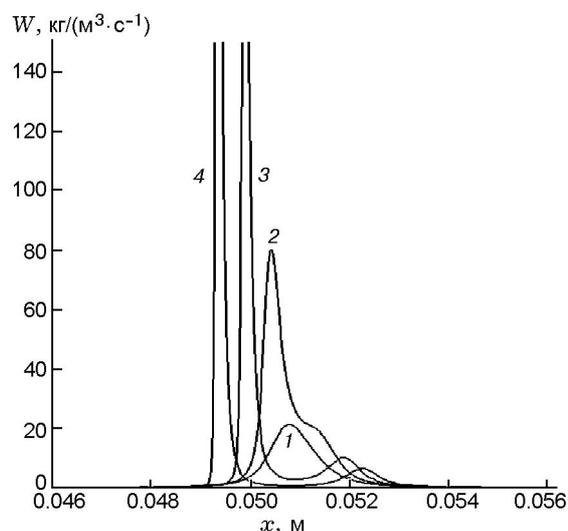


Рис. 3. Последовательное изменение профиля скорости химической реакции после воспламенения в прямой трубке:

1–4 — шаг по времени $3.25 \cdot 10^{-7}$ с

ной выше по потоку от точки зажигания. После этого свежая смесь заполняла трубку и достигала горячей области, где с некоторой задержкой, обусловленной нагревом свежей смеси от стенок трубки, происходило воспламенение, и процесс периодически повторялся во времени. Это явление в работе [6] названо FREI. Расчеты по двухкомпонентной модели (1)–(3) показали, что в процессе воспламенения появляются два максимума скорости химической реакции, которые соответствуют двум фронтам реакции, движущимся в противоположные стороны (см. рис. 3). Большой пик скорости реакции на рис. 3 соответствует обычному пламени, распространяющемуся против потока, тогда как более слабый пик соответствует движению фронта реакции вдоль потока. Спустя некоторое время оба фронта затухали, но по разным причинам. Пламя, распространяющееся навстречу потоку, достигало области, где температура стенок была низкой, и исчезало из-за теплопотерь на холодном конце трубки. Фронт реакции, распространяющийся по потоку, погасал из-за выгорания топлива в горячей области трубки.

На рис. 4 представлена эволюция массовой доли топлива. Профили концентрации даны в те же самые моменты времени, что и на рис. 3. Численное моделирование показывает, что уменьшение концентрации горючего начинается не на передней кромке диффузионно-

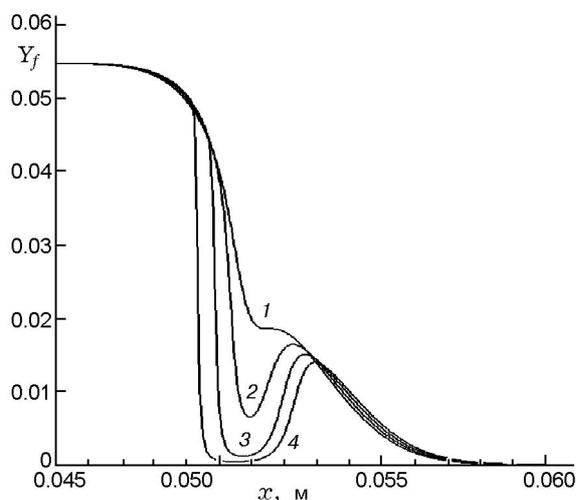


Рис. 4. Последовательное изменение профиля концентрации топлива после воспламенения в прямой трубке:

1–4 — шаг по времени $3.25 \cdot 10^{-7}$ с

го профиля, где температура смеси наибольшая, а в средней части профиля концентрации, где температура смеси ниже. Направление движения потока газа совпадает с направлением оси x на рис. 3 и 4, а горячая часть трубки расположена справа. Такая особенность воспламенения связана с тем, что скорость реакции является функцией как температуры, так и концентрации реагентов, поэтому положение максимума скорости химической реакции зависит не только от поля температур, но и от распределения концентраций окислителя и горючего. При заполнении трубки горючей смесью граница раздела между продуктами горения и горючим газом размыта из-за диффузии реагентов, поэтому воспламенение происходит не на передней кромке профиля горючего, а в точке, где скорость реакции максимальна. Из рис. 3 и 4 видно, что два фронта химической реакции появляются в одной точке и затем расходятся в разные стороны. Поэтому данное явление можно назвать разделяющимися пламенами.

Моделирование периодического воспламенения в радиальном канале с симметричными начальными условиями тоже показало возможность возникновения разделяющихся пламен. После воспламенения в радиальном канале появлялись два цилиндрических фронта химической реакции. Один фронт двигался к оси симметрии системы, а другой распространялся по потоку в радиальном направлении. Механизм

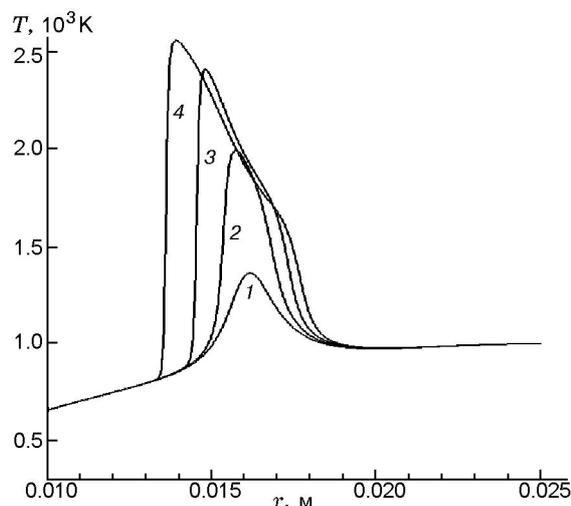


Рис. 5. Эволюция температуры газа в радиальном канале после воспламенения ($G = 0.001 \text{ м}^2/\text{с}$):

1–4 — шаг по времени $4.7 \cdot 10^{-4}$ с

погасания фронтов реакции здесь тот же самый, что и в прямой трубке. Пламя, движущееся против потока, достигало области с холодными стенками и гасло из-за теплопотерь. Другой фронт горения, распространяющийся по радиусу, погасал из-за выгорания топлива. Профили концентрации и скорости химической реакции в этом случае качественно имели тот же вид, что и профили, рассчитанные для трубки (см. рис. 3 и 4). Распределения температуры газа после воспламенения в радиальном канале приведены на рис. 5. Профили температуры показаны через последовательные моменты времени с интервалом $4.7 \cdot 10^{-4}$ с, что соответствовало 1000 шагам по времени, при $G = 0.001 \text{ м}^2/\text{с}$.

Эффект разделяющихся пламен исследовался и для случая, когда свежая смесь заполняла радиальный канал несимметрично относительно оси вращения. Рассматривалась двумерная постановка задачи, когда распределения температуры и концентраций зависели как от радиальной координаты r , так и от угловой переменной φ , где (r, φ) — полярные координаты. Пространственное распределение смеси в начальный момент времени описывалось выражением

$$Y_{f,ox} = Y_{f,0}^0 \quad \text{при } r_0 < x < r_b - (r_b - r_a) \frac{\varphi}{2\pi},$$

$$Y_{f,ox} = 0 \quad \text{при } r_b - (r_b - r_a) \frac{\varphi}{2\pi} < x < R_0, \quad (12)$$

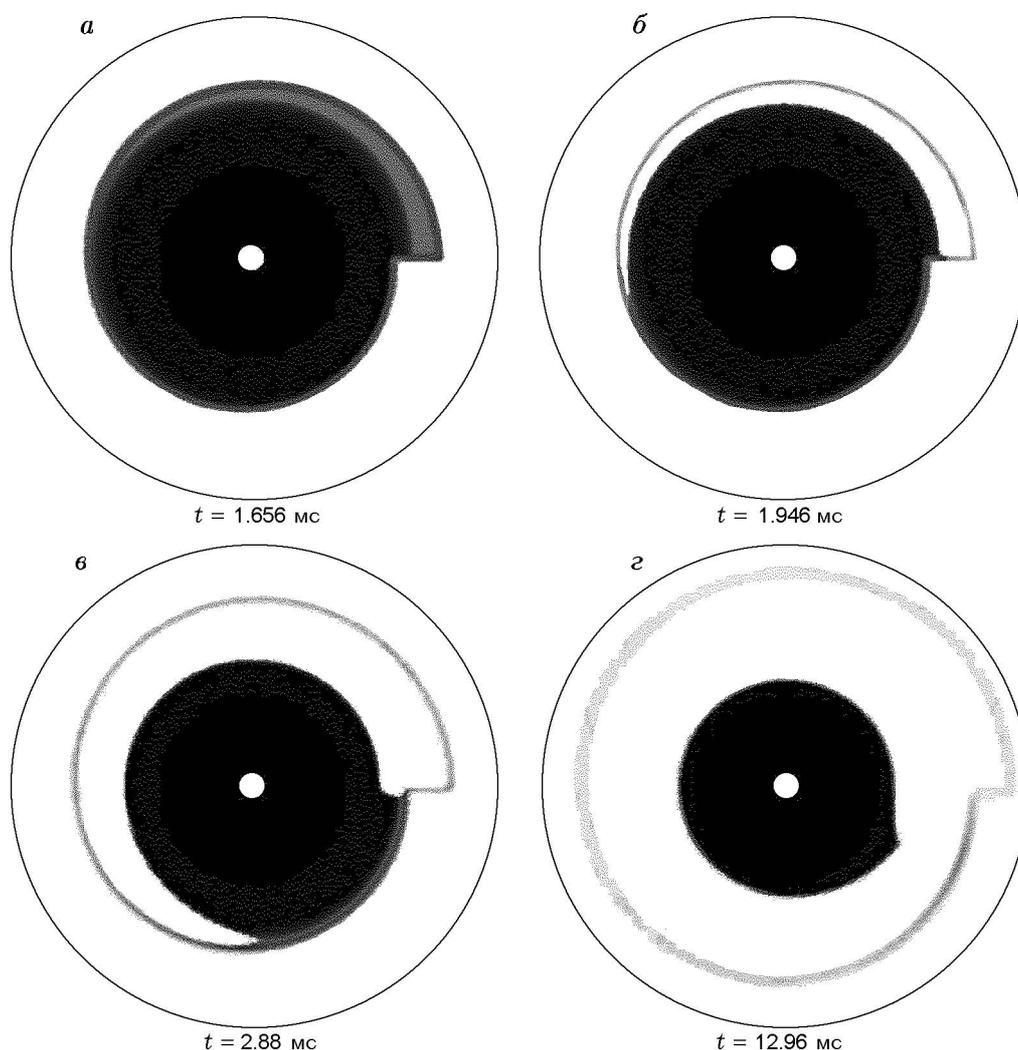


Рис. 6. Распределения концентрации топлива (показаны оттенками серого цвета) в различные моменты времени

где $r_a = 0.022$ м и $r_b = 0.03$ м. Распределение температуры в газе в начальный момент времени совпадало с распределением температуры в стенках. Поле течения считалось заданным, и радиальная скорость была обратно пропорциональна радиусу, как и в одномерной постановке (5). В модели учитывалось, что диффузионный перенос тепла и реагентов происходит как в радиальном направлении, так и по углу. В этом случае оператор Δ в уравнениях (1)–(3) имеет вид

$$\Delta = \frac{1}{r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}. \quad (13)$$

Расчетная область — $r_0 < x < R_0$, где $r_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $R_0 = 0.04$ м, сетка имела 1000 уз-

лов по угловой переменной и 1000 точек по радиусу. На границах области были заданы граничные условия (9), (10). Для расчета использовалась явная разностная схема второго порядка точности по пространству. Шаг по времени выбран $2.8 \cdot 10^{-7}$ с. Значения параметров те же, что и в одномерной постановке, а $G = 0.015$ м²/с.

На рис. 6 показаны распределения концентрации топлива в моменты времени $1.656 \cdot 10^{-3}$, $1.946 \cdot 10^{-3}$, $2.88 \cdot 10^{-3}$ и $12.96 \cdot 10^{-3}$ с соответственно. Расчеты показали, что после воспламенения формировались два фронта химической реакции, которые имели общую точку, распространяющуюся по углу в сторону несгоревшей смеси. Тангенциальная скорость рас-

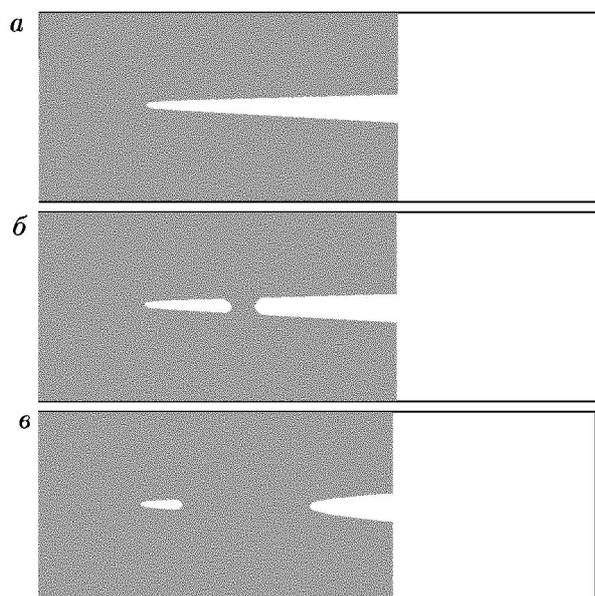


Рис. 7. Схема образования «карманов», заполненных свежей смесью, в продуктах горения (серый цвет)

пространения этой лидирующей точки примерно в 2–3 раза превышала нормальную скорость для данной смеси. Совершив один оборот вокруг оси симметрии системы, данная конфигурация трансформировалась в круговое пламя. Из рис. 6 видно, что во время движения свежая смесь оказывается разделенной продуктами горения. Одна область, заполненная не до конца прореагировавшей свежей смесью, смещалась вместе с потоком газа к периферии. Этот результат показывает, что в случае, когда радиус камеры сгорания недостаточно большой, остаток непрореагировавшей смеси может вытекать из системы, что привело бы к недогоранию свежей смеси.

Данные расчеты продемонстрировали возможность образования структур, распространяющихся в тангенциальном направлении с большой скоростью. Несмотря на то, что в рассмотренном примере в процессе эволюции устанавливалось устойчивое круговое пламя, можно предположить, что в некоторых случаях могут сформироваться вращающиеся структуры с лидирующей точкой, непрерывно движущейся по круговой траектории. Тогда волна горения принимала бы форму вращающейся спирали или других вращающихся структур, наблюдаемых в экспериментах [10, 11]. Эффект разделяющихся пламен, по-видимому,

можно связать и с образованием «островков» или областей, заполненных свежей смесью и окруженных продуктами горения [13]. Предположим, что в один из моментов времени вихревое течение вытягивает свежую смесь в область продуктов горения, так, как это показано на схеме на рис. 7. В этом случае можно считать, что свежая смесь движется как бы в канале с нагретыми стенками. Результаты данной работы позволяют предположить, что воспламенение свежей смеси произойдет не на передней границе между свежей смесью и продуктами горения, а в точке, расположенной на некотором расстоянии от передней кромки. Это приведет к тому, что в области продуктов горения сформируется замкнутая область, заполненная горючей смесью. Поскольку горячие продукты горения быстро нагревают область со свежей смесью, то возможно объемное реагирование данной порции горючего газа, которое может сопровождаться образованием ударных волн и локальным повышением давления. Если ударная волна, образовавшаяся из-за быстрого сгорания островка свежей смеси, окажется достаточно интенсивной, она, достигнув основного объема со свежей смесью, сможет инициировать и детонационную волну. Этот пример позволяет предположить, что эффект разделяющихся пламен может быть связан с явлением перехода горения в детонацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана возможность одновременного образования двух фронтов химической реакции при нестационарном горении газа в прямой трубке и в зазоре между двумя дисками с радиальной подачей топлива. В обоих случаях характерный поперечный размер канала был меньше критического диаметра, определенного для температуры окружающей среды, и горение газа происходило в области, где температура стенок превышала температуру окружающей среды. Численное исследование процессов периодического воспламенения и затухания пламени продемонстрировало возможность одновременного образования двух фронтов химической реакции в горячей части канала. Один фронт соответствовал нормальному пламени, распространяющемуся вверх по потоку от горячей к холодной части канала, а другой фронт двигался по потоку и затухал по мере выгорания топлива. На основе данного исследования предложен новый механизм воспла-

менения и неполного сгорания горючей смеси в микросистемах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Nam Il Kim, Kato S., Kataoka T., Yokomori T., Maruyama S., Fujimori T., Maruta K.** Flame stabilization and emission of small swiss-roll combustors as heaters // *Combust. Flame.* — 2005. — V. 141. — P. 229–240.
2. **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.
3. **Zamashchikov V. V.** Experimental investigation of gas combustion regimes in narrow tubes // *Combust. Flame.* — 1997. — V. 108, N 3. — P. 357–359.
4. **Фурсенко Р. В., Минаев С. С., Бабкин В. С.** Тепловое взаимодействие двух фронтов пламени, распространяющихся в каналах с противоположно направленными потоками газа // *Физика горения и взрыва.* — 2001. — Т. 37, № 5. — С. 3–11.
5. **Sereshchenko E., Minaev S., Fursenko R.** Theoretical and experimental investigation of premixed flame stabilization in single pass counterflow microcombustor // *Proc. of the 6th Asia-Pacific Conf. on Combustion ASPACC 07.* — 2007. — P. 567.
6. **Maruta K., Kataoka T., Nam Il Kim, Minaev S., Fursenko R.** Characteristics of combustion in a narrow channel with a temperature gradient // *Proc. Combust. Inst.* — 2005. — V. 30. — P. 2429–2436.
7. **Марута К., Парк Дж. К., Ох К. С., Фуджимори Т., Минаев С. С., Фурсенко Р. В.** Особенности горения газа в узком нагретом канале // *Физика горения и взрыва.* — 2004. — Т. 40, № 5. — С. 21–29.
8. **Minaev S., Maruta K., Fursenko R.** Nonlinear dynamics of flame in a narrow channel with a temperature gradient // *Combustion Theory Modelling.* — 2007. — V. 11, N 2. — P. 187.
9. **Fateev G. A., Rabinovich O. S., Silenkov M. A.** Oscillatory combustion of a gas mixture blow through a porous medium or a narrow tube // *Proc. Combust. Inst.* — 1998. — V. 27. — P. 3147–3153.
10. **Kumar S., Maruta K., Minaev S.** Pattern formation of flames in radial microchannels with lean methane-air mixtures // *Phys. Rev. E.* — 2007. — V. 75, N 1.
11. **Kumar S., Maruta K., Minaev S.** On the formation of multiple rotating pelton-like flame structures in radial microchannels with lean methane-air mixtures // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31. — P. 3261–3268.
12. **Minaev S., Fursenko R., Bakirova N., Kumar S., Maruta K.** Modeling of traveling structures in radial microchannels with a wall temperature gradient // *Proc. of 6th Asia-Pacific Conf. on Combustion ASPACC 07.* — 2007. — P. 546–549.
13. **Sun C. J., Law C. K.** On the consumption of fuel pockets via inwardly propagating flames // *Proc. Combust. Inst.* — 1998. — V. 27. — P. 963–970.

Поступила в редакцию 18/IV 2008 г.