

УДК 536.46

## РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОЙ СМЕСИ ГАЗОВ В НАГРЕТОМ МИКРОКАНАЛЕ С ПЛАВНО ВОЗРАСТАЮЩЕЙ ПО ПОТОКУ ГАЗА ТЕМПЕРАТУРОЙ СТЕНОК

Д. Б. Мазурок<sup>1,2</sup>, Р. В. Фурсенко<sup>1,2</sup>, С. С. Минаев<sup>1,2</sup>, Н. А. Луценко<sup>2</sup>,  
С. Кумар<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск  
mnzrka@gmail.com

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, 690091 Владивосток

<sup>3</sup>Индийский технологический институт, 400 076 Бомбей, Индия

В рамках одномерной диффузионно-тепловой модели теоретически исследованы особенности нестационарного пламени в микроканале с контролируемой температурой стенок. Рассмотрен случай, когда температура стенок канала увеличивается вдоль направления потока газа и размер канала меньше критического, определенного по температуре окружающей среды. В зависимости от расхода горючей смеси газов через канал возможна стабилизация пламени или режим периодического воспламенения и затухания пламени. Впервые исследовано влияние характерной длины прогрева стенок канала на области существования различных режимов горения. Теоретические исследования показали, что существует критическое значение градиента температуры в стенках канала, ниже которого исчезает режим периодического воспламенения и затухания пламени. При малых значениях градиента температуры обнаружено явление гистерезиса, связанное с неодинаковым изменением положения пламени при возрастании или уменьшении расхода газа.

Ключевые слова: стабилизация пламени, микроканал, воспламенение, затухание пламени, пределы существования пламени.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время создание малоразмерных источников тепла с контролируемой мощностью и низким содержанием вредных выбросов, таких как  $\text{NO}_x$ , использующих энергию от сжигания углеводородных топлив, является актуальной задачей. Возможным решением этой проблемы может стать использование нагревательных элементов, состоящих из набора микрогорелок с контролируемым процессом горения, которые могли бы работать на бедных смесях топлива. Разработка подобных тепловых источников позволит перейти в производстве, требующем высокоточного контролируемого нагрева обрабатываемых элемен-

тов, с электрического обогрева на более дешевый — газовый. Создание микрогорелочных устройств вызывает интерес и в связи с разработкой 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 при одинаковых весе и размерах по сравнению с традиционными электрическими аккумуляторами [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 критического [3], который уменьшается при увеличении температуры стенок. Поэтому одним из путей организации горения в микрогорелочных устройствах может быть повышение температуры стенок камеры сгорания за счет тепловой рециркуляции [4, 5]. Основные механизмы го-

\*Kumar S.

Indian Institute of Technology, 400 076 Bombay, Powai, Mumbai India.

Работа выполнена при частичной поддержке интеграционного проекта СО РАН № 38, Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11 08 92 692 ИНД.а) и Научного фонда ДВФУ (№ 12-08-13007-05).

© Мазурок Д. Б., Фурсенко Р. В., Минаев С. С.,  
Луценко Н. А., Кумар С., 2014.

рения газов в системах с рециркуляцией тепла могут быть выяснены при исследовании горения газов в узком канале с нагретыми стенками. В системах с регенерацией тепла профили температуры в стенках канала формируются волной горения и зависят от температуры пламени, условий теплообмена и положения фронта пламени. Процессы регенерации и выделения тепла в результате химической реакции связаны между собой и влияют друг на друга сложным образом. На начальном этапе исследования горения в малоразмерных системах можно разделить процессы регенерации тепла и горения и тем самым упростить модель до трубки, нагреваемой внешним источником тепла. Поскольку характерное время установления теплового равновесия в стенках горелочного устройства обычно больше, чем в газовой фазе, и больше характерного времени горения, то можно предположить, что предлагаемое упрощение не повлияет на физический механизм изучаемых явлений. Эксперименты по горению газа в прямом нагретом микроканале диаметром меньше критического, соответствующего температуре окружающей среды, обнаружили интересное явление периодического воспламенения/затухания пламени [6, 7] в некотором диапазоне расходов газа. Вне этого диапазона при больших расходах наблюдалось стабильное горение, а при очень малых расходах газа формировалось слабо светящееся пламя с растянутой зоной горения (weak flame). В обоих случаях пламя стабилизировалось в определенной позиции внутри нагретого канала. В работах [6, 8–10] в рамках одномерной диффузионно-тепловой модели выполнено моделирование стабилизации пламени, нелинейных осцилляций и периодического воспламенения и погасания пламени. В предыдущих исследованиях характерная длина прогрева стенок канала была фиксированной. Настоящая работа посвящена исследованию поведения пламени в нагретом канале при различных значениях градиента температуры стенок канала.

Интерес к исследованию периодического воспламенения/затухания пламени в микроканале с повышенной температурой стенок вызван тем, что данное явление препятствует организации стабильного горения в микрогорелках и сопровождается образованием нежелательных выбросов. С другой стороны, как показано в работе [7], данные о структуре пламени в микроканале с контролируемой темпе-

ратурой стенок при малых расходах газа позволяют получать важную информацию о кинетических механизмах химических реакций при горении новых видов топлив и другие важные характеристики горючих газовых смесей. Новая методика может быть основана на сравнении результатов расчетов с данными эксперимента о положении максимума зон энерговыделения и о распределении химических компонентов относительно стенок микроканала с контролируемым продольным градиентом температуры и расходом горючей смеси. Ограничения в использовании данной методики связаны с тем, что при увеличении расхода газа возникает неустойчивое горение в виде периодического воспламенения/затухания или осцилляций пламени.

Цель данной работы — анализ влияния продольного градиента температуры и максимальной температуры в стенках микроканала на устойчивость горения метановоздушных смесей. Для получения диаграмм режимов горения применялась одномерная диффузионно-тепловая модель, которая позволила дать качественное описание процессов в широком диапазоне параметров.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Схема горения в плоском канале приведена на рис. 1. Предварительно перемешанная газовая смесь подается в канал с повышен-



Рис. 1. Схема горения газа в микроканале (а) и распределение температуры  $\theta$  в стенках канала (б)

ной температурой стенок, которая увеличивается вдоль направления течения газа и достигает заданного максимального значения при  $x = 0$ . Считается, что во время горения газа распределение температуры в стенках канала не меняется, поскольку температура стенок поддерживается за счет внешнего подогрева. Это приближение соответствует условиям эксперимента, описанного в работе [7], в которой было показано, что распределение температуры в стенках канала при горении газа и в его отсутствие практически не изменяется. Этот эффект достигается за счет достаточно интенсивного внешнего подогрева, при котором мощность внешнего источника тепла намного больше мощности энерговыделения при горении смеси в канале.

Одномерные безразмерные уравнения, описывающие распределение температуры газа и концентрации топлива при горении бедной смеси газов в микроканале с заданной температурой стенок, имеют вид [8]

$$C_t + VC_x = \frac{1}{\text{Le}} C_{xx} - W(C, T), \quad (1)$$

$$T_t + VT_x = T_{xx} - \Omega(T - \theta) + (1 - \sigma)W(C, T).$$

Здесь безразмерное время  $t$  измеряется в единицах  $D_{th}/U_b^2$ , безразмерная пространственная координата  $x$  — в единицах  $D_{th}/U_b$ , где  $D_{th}$  — температуропроводность газа,  $U_b$  — адиабатическая скорость плоского пламени;  $C$  — концентрация недостающего компонента смеси (горючего — в случае бедных метановоздушных смесей), измеряемая в единицах  $C_0$  — концентрации недостающего компонента в свежей смеси. Температура стенок канала  $\theta$  и температура газа  $T$  измеряются в единицах адиабатической температуры пламени  $T_b$ ;  $V$  — скорость газа, измеряемая в единицах  $U_b$ ;  $\text{Le} = D_{th}/D_{mol}$  — число Льюиса, где  $D_{mol}$  — коэффициент молекулярной диффузии топлива. Предполагается ньютоновский теплообмен между газом и стенками канала. Безразмерный параметр теплообмена  $\Omega = 4\text{Nu}/\text{Pe}^2$  связан с числом Нуссельта  $\text{Nu} = \alpha d_0/\lambda_g$  и числом Пекле  $\text{Pe} = U_b d_0/D_{th}$ , где  $d_0$  — поперечный размер канала,  $\lambda_g$  — теплопроводность газа,  $\alpha$  — ньютоновский коэффициент теплообмена. Безразмерная скорость реакции задавалась в виде

$$W(C, T) = \frac{1}{2\text{Le}} N^2(1 - \sigma)^2 C \exp \left[ N \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right].$$

Здесь  $N = E/RT_b$  — безразмерная энергия активации химической реакции,  $\sigma = T_0/T_b$ , где  $T_0$  — начальная температура свежей смеси. Распределение температуры стенки имеет вид

$$\theta = \begin{cases} \sigma + (\Theta - \sigma) \exp(-\eta x), & x > 0, \\ \Theta, & x \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $\Theta = T_w/T_b$ , где  $T_w$  — температура стенок на горячем конце канала;  $\eta = D_{th}\eta_0/U_b$ , где  $1/\eta_0$  — характерный пространственный масштаб изменения температуры стенок. Максимальное значение температурного градиента в стенках канала равно  $(\Theta - \sigma)\eta$ , и при заданном значении  $\Theta$  максимальный градиент линейно пропорционален параметру  $\eta$ .

В данной работе исследовалось влияние параметра  $\eta$  на пределы воспламенения и динамическое поведение пламени.

Нестационарные уравнения (1) с граничными условиями  $C = 1$ ,  $T = \sigma$  на правом и  $C_x = 0$ ,  $T_x = 0$  на левом концах канала (см. рис. 1) решались численно с использованием явной конечно-разностной схемы на адаптивной сетке. Инициирование пламени осуществлялось за счет нагрева смеси от стенок канала.

Для расчета, исходя из эксперимента, были выбраны наборы параметров  $T_b$  и  $U_b$ , соответствующие бедной метановоздушной смеси с различными коэффициентами избытка топлива  $\phi$  (см. таблицу). В расчетах считалось, что  $\text{Le} = 0.9$ ,  $E/R = 15\,000$  К,  $D_{th} = 0.4$  см<sup>2</sup>/с. Диаметр канала  $d_0 = 0.2$  см был меньше критического, определенного при нормальных условиях для стехиометрической смеси с начальной температурой  $T_0 = 290$  К. Максимальная температура стенок на горячем конце канала  $T_w = 1\,300$  К, что примерно соответствовало экспериментальным условиям работы [7].

Параметры  $U_b$  и  $T_b$  при различных значениях  $\phi$ , выбранные из экспериментальных данных

$\phi$	$T_b$ , К	$U_b$ , см/с
0.58	1 440	8.2
0.65	1 572	12.7
0.7	1 670	16.7
0.8	1 856	26.4

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Расчеты при характерном пространственном масштабе изменения температуры стенок канала  $\eta_0 = 0.51 \text{ см}^{-1}$  показали, что иницирование горения при больших расходах газа приводило к стабилизации волны в горячей части канала, а при уменьшении расхода газа возникал режим периодического воспламенения/затухания пламени. При малых расходах газа вновь наблюдалась стабилизация волны горения. На качественном уровне такое поведение пламени совпадает с теоретическими и экспериментальными результатами [6–12]. На рис. 2 показаны зависимости положения фронта пламени от скорости потока свежей смеси, рассчитанные при  $\phi = 0.58, 0.65, 0.8$ . Координата фронта пламени, задаваемого максимумом тепловыделения в зоне реакции, отсчитывалась от точки, где достигается максимальное значение температуры стенок (см. рис. 1, б).

Верхняя часть зависимостей  $v(x_f)$ , обозначенных сплошными линиями на рис. 2, может быть ассоциирована с «нормальным» пламенем. Эти решения соответствуют классическому устойчивому решению задачи о пламени с теплотерями [3] в том смысле, что при  $\Theta \rightarrow \text{const}$  решение переходит в решение задачи о

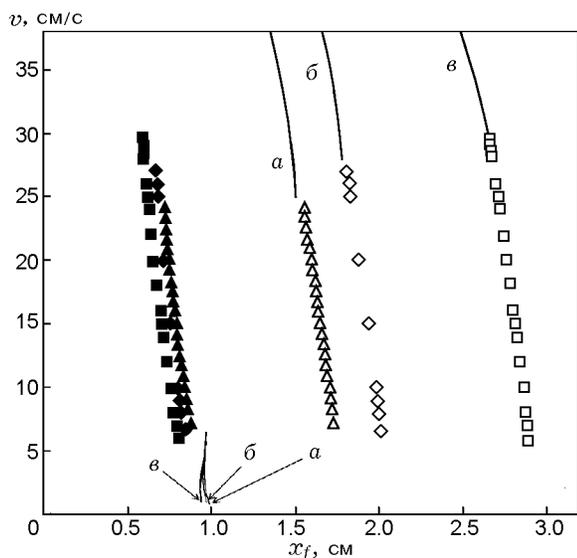


Рис. 2. Зависимости положения фронта пламени от скорости смеси, рассчитанные при  $\eta_0 = 0.51 \text{ см}^{-1}$  и  $\phi = 0.58$  (а, треугольники),  $0.65$  (б, ромбы),  $0.8$  (в, квадраты):

темные точки — поджигание, светлые — затухание

распространении неадиабатического пламени. Промежуточные ветви соответствуют неустойчивому решению — периодическому воспламенению и затуханию пламени, описанному в работах [6–10]. На рис. 2 показаны точки затухания (темные точки) и воспламенения (светлые точки). В этом режиме пламя формируется в горячей области канала, распространяется вверх по потоку и затухает в холодной части канала. После затухания горючая смесь заполняет канал, и процесс повторяется. Расстояние между точками воспламенения и затухания зависит от состава смеси, оно уменьшается по мере обеднения смеси, и точки затухания пламени смещаются вниз по потоку в горячую область канала. Интересно, что для разных смесей точки воспламенения расположены примерно в одной области канала. Существует режим горения при малых скоростях газа. Для него характерна также пониженная температура пламени, вследствие чего такое пламя было названо в работе [8] слабым (weak flame). Температура газа близка к температуре стенок всюду, кроме узкой зоны в окрестности пламени. Положение фронта пламени при горении газа в этом режиме показано на рис. 2 сплошными линиями ниже точек воспламенения/затухания.

Зависимость координаты фронта пламени от времени приведена на рис. 3. При низких скоростях зависимость имеет довольно сложный вид: периодическое воспламенение/гашение пламени чередуется с мелкими осцилляциями фронта (рис. 3, а).

При меньших значениях температурного градиента в стенках канала  $\eta_0 = 0.062 \text{ см}^{-1}$

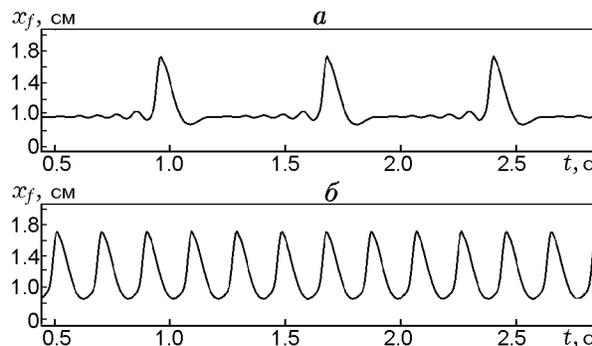


Рис. 3. Зависимость положения фронта пламени от времени в различных режимах горения при  $\phi = 0.58$  и  $\eta_0 = 0.51 \text{ см}^{-1}$ :

а — «простые» колебания при  $v = 7.5 \text{ см/с}$ , б — «сложные» колебания при  $v = 6.64 \text{ см/с}$

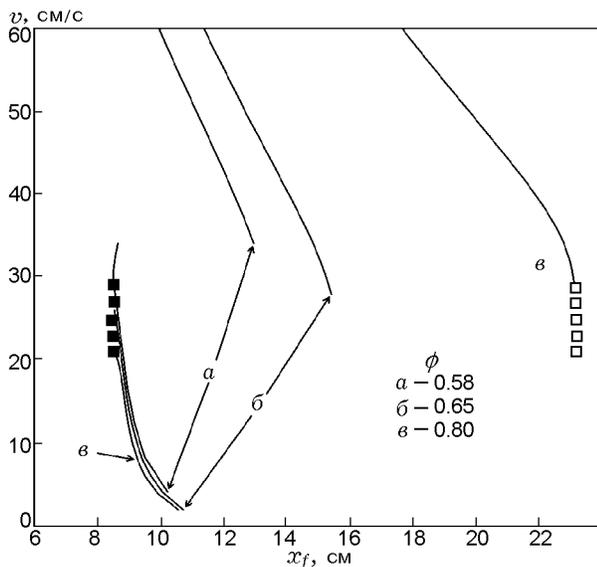


Рис. 4. Зависимости положения фронта пламени от скорости смеси, рассчитанные при  $\eta_0 = 0.062 \text{ см}^{-1}$  и различных значениях  $\phi$ : темные точки — поджигание, светлые — затухание

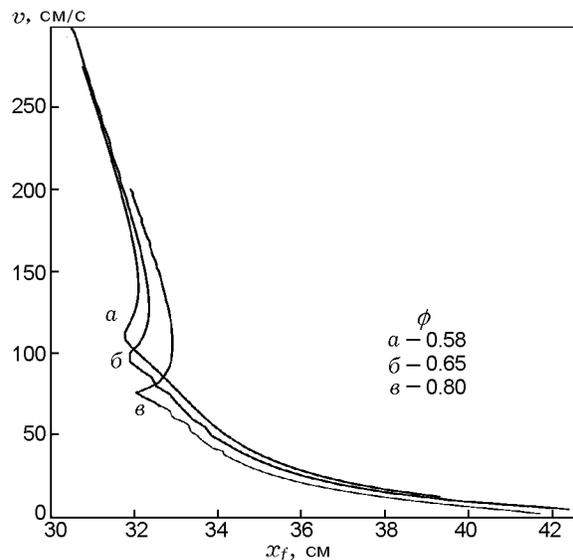


Рис. 5. Зависимости положения фронта пламени от скорости смеси, рассчитанные при  $\eta_0 = 0.016 \text{ см}^{-1}$  и различных значениях  $\phi$

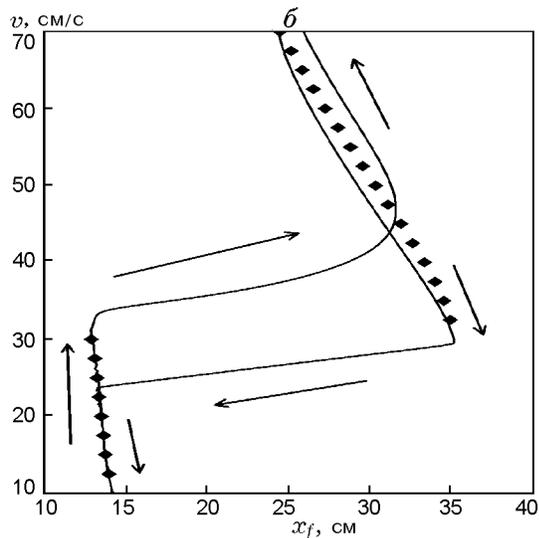
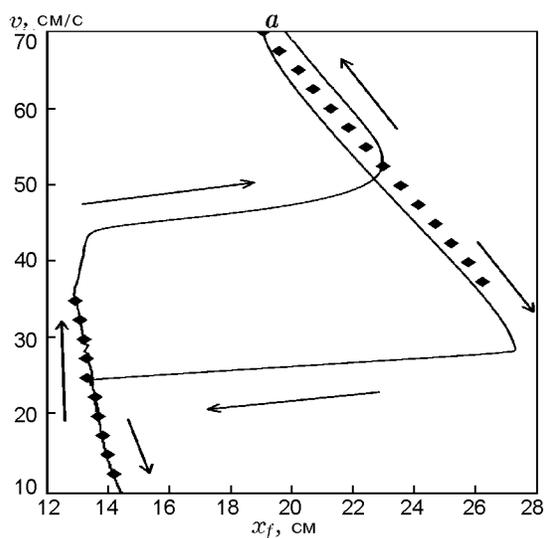


Рис. 6. Зависимости положения фронта пламени от скорости смеси, рассчитанные при  $\eta_0 = 0.041 \text{ см}^{-1}$  и  $\phi = 0.7$  (а),  $0.8$  (б):

точки — стационарные решения, соответствующие постоянной скорости, линии со стрелками — траектории переходов при изменении скорости во времени

для тех же смесей газов периодическое воспламенение/затухание наблюдалось лишь для самого богатого состава —  $\phi = 0.8$  (рис. 4). В двух других случаях пламя стабилизировалось во всем диапазоне скоростей. Положение устойчивого фронта пламени менялось скачком при некотором значении расхода газа. При малых

температурных градиентах  $\eta_0 = 0.016 \text{ см}^{-1}$  зависимость координат фронта пламени от скорости газа во всех трех случаях описывалась непрерывными кривыми (рис. 5).

Обнаруженное скачкообразное изменение положения фронта пламени при небольшом изменении скорости газа может приводить к яв-

лению гистерезиса. В этом случае переход от одной ветви решения к другой происходит разными путями в зависимости от скорости газа. Для иллюстрации этого явления на рис. 6 построена траектория фронта пламени при изменении во времени скорости газа при  $\eta_0 = 0.041 \text{ см}^{-1}$  для смесей с  $\phi = 0.7$  (а) и  $0.8$  (б). В случае, когда скорость увеличивалась по закону  $v(t) = v_1 + (v_2 - v_1)[1 - \exp(-t/\tau)]$ ,  $t > 0$ , где  $v_1 = 10 \text{ см/с}$ ,  $v_2 = 70 \text{ см/с}$ ,  $\tau = 4 \text{ с}$ , переход с нижней на верхнюю ветвь происходил с некоторым запаздыванием и траектория фронта пламени отличалась от траектории, характерной для перехода от верхней ветви решения к нижней. В последнем случае скорость уменьшалась по закону  $v(t) = v_2 + (v_1 - v_2)[1 - \exp(-t/\tau)]$ ,  $t > 0$ .

В случае периодического изменения скорости по закону  $v(t) = v_3 + \delta \cos(\omega t)$ ,  $0 < t < 3\vartheta$ , где  $v_3 = 40 \text{ см/с}$ ,  $\delta = 20 \text{ см/с}$ ,  $\omega = 2\pi/\vartheta$ ,  $\vartheta = 10 \text{ с}$ , траектории фронта пламени, рассчитанные для смесей с коэффициентами избытка топлива  $\phi = 0.7, 0.8$ , показаны на рис. 7. Они имеют вид замкнутых кривых. Отметим, что, несмотря на небольшое отличие составов газа, изменение положения фронта в этих двух случаях довольно значительное.

В данной работе применялась простая одномерная модель, игнорирующая возможное неоднородное распределение скорости в канале и детальный механизм химических реак-

ций. Основываясь на результатах работы [13], можно предположить, что радиационный теплообмен даст лишь количественные поправки к границам устойчивости режимов горения, качественно картина не изменится. В связи с этим радиационный теплообмен между газом и стенками канала в данной модели не учитывался. Предыдущие исследования в рамках тех же предположений показали, что данная модель, несмотря на простую формулировку, все же позволяет качественно, а в некоторых случаях и количественно воспроизвести основные режимы горения газа в микроканале с неоднородно нагретыми стенками. Результаты работы [12], в которой использовался детальный кинетический механизм горения смесей метана с воздухом, подтверждают вывод о существовании режима периодического воспламенения/затухания в некотором диапазоне расходов газа и другие особенности динамического поведения пламени, обнаруженные в рамках простой модели [7, 8, 14]. Поэтому основной вывод данной работы об исчезновении режима периодического воспламенения/затухания и существовании гистерезисных явлений в канале с плавным температурным градиентом в стенках, по-видимому, не изменится и при использовании более детальной модели горения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках одномерной диффузионно-тепловой модели теоретически исследованы особенности нестационарного поведения пламени в микроканале с контролируемой температурой стенок. Рассмотрен случай, когда температура стенок канала увеличивается вдоль направления потока газа. Теоретические исследования показали, что существует критическое значение градиента температуры в стенках канала, ниже которого исчезает режим периодического воспламенения и затухания пламени. При малых градиентах температуры обнаружено явление гистерезиса, связанное с неодинаковым изменением положения пламени при возрастании или уменьшении расхода газа. Полученные качественные диаграммы, указывающие границы области существования стационарных низкоскоростных режимов горения, могут быть использованы для реализации стабильного горения в микросистемах и для исследования структуры газофазных пламен в микроканалах с контролируемой температурой стенок.

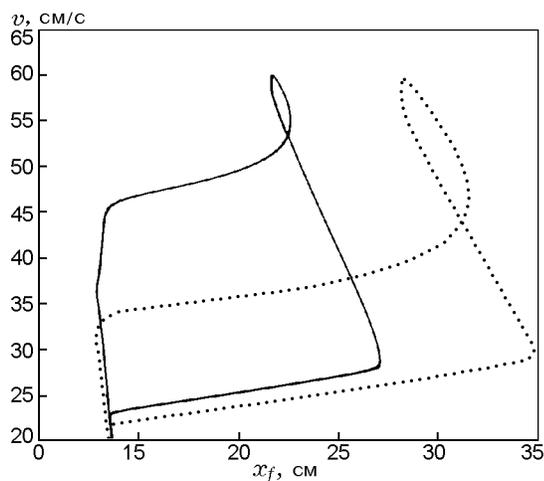


Рис. 7. Зависимости положения фронта пламени от скорости смеси, меняющейся по периодическому закону, рассчитанные при  $\eta_0 = 0.041 \text{ см}^{-1}$  и  $\phi = 0.7$  (пунктирная линия),  $0.8$  (сплошная линия)

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Fennandez-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 // Prog. in Energy and Combust. Sci. — 2005. — V. 31. — P. 422–465.
3. **Зельдович Я. Б.** Теория предела распространения тихого пламени // Журн. эксперим. и теор. физики. — 1941. — Т. 11, № 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 // AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, January 8–11, 2001. — V. 39. — Paper No 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. — (27th Symp. (Intern.) on Combustion).
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. S., Maruta K., Fursenko R. V.** Nonlinear dynamics of flame in a narrow channel with a temperature gradient // Combust. Theory and Modeling. — 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. **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.
11. **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).
12. **Nakamura H., Fan A., Minaev S. S., Sereshchenko E. V., Fursenko R. V., Tsuboi Y., Maruta K.** Bifurcations and negative propagation speeds of methane/air premixed flames with repetitive extinction and ignition in a heated microchannel // Combust. Flame. — 2012. — V. 159 — P. 1631–1643.
13. **Палесский Ф. С., Минаев С. С., Фурсенко Р. В., Баев В. К., Кирдяшкин А. И., Орловский В. М.** Моделирование горения предвзрывательно перемешанных смесей газов в расширяющемся канале с учетом радиационных теплопотерь. // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 1. — С. 21–27.
14. **Минаев С. С., Серещенко Е. В., Фурсенко Р. В., Фан А., Марута К.** Разделяющиеся пламена в узком канале с градиентом температуры в стенках // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 45, № 2. — С. 12–19.

*Поступила в редакцию 9/IX 2012 г.,  
в окончательном варианте — 17/VI 2013 г.*