

## НЕСТАЦИОНАРНОЕ ГОРЕНИЕ ГАЗА В ИНЕРТНОМ ПОРИСТОМ СЛОЕ

В. Г. Прокофьев<sup>1</sup>, А. И. Кирдяшкин<sup>2</sup>, В. Г. Саламатов<sup>2</sup>, В. К. Смоляков<sup>2</sup><sup>1</sup>Томский государственный университет, 634050 Томск, pvg@ftf.tsu.ru<sup>2</sup>Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, 634021 Томск

Рассмотрено нестационарное фильтрационное горение газа в инертном пористом слое с учетом распределения давления газа в порах. Определены пределы стационарного режима горения внутри слоя в зависимости от расхода газа и параметров межфазного теплообмена. Показана возможность существования автоколебательного режима фильтрационного горения.

Ключевые слова: фильтрационное горение газа, межфазный теплообмен, автоколебательный режим горения.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка и создание мощных СВС-конверторов связаны с использованием свойств фильтрационного горения газов. Фильтрующий элемент установки — конвертор — представляет собой пористую металлокерамическую трубу или пластину, которая вмонтирована в стандартную газовую горелку. В качестве пористого материала используется СВС-керамика на основе соединений никеля и алюминия с известными теплофизическими и структурными свойствами. Конвертор за счет концентрации энергии в пористом слое обеспечивает эффективное сжигание природного газа и других углеводородов и передачу тепловой энергии излучением.

Развитие существующих и создание новых СВС-конверторов с целью увеличения мощности излучения неразрывно связаны с исследованием режимов и структуры волны фильтрационного горения газа в инертной пористой среде. Разнообразие физико-химических процессов, большое число параметров, влияющих на закономерности и режимы фильтрационного горения, в сочетании с конструктивными особенностями самой горелки определяют математическое моделирование как эффективный метод теоретического исследования. В основе математических моделей фильтрационного горения газа и конденсированных веществ лежат уравнения механики многофазных сред, дополненные уравнениями химической кинетики [1]. Достаточно полный обзор экспериментальных и теоретических работ по фильтрационному горению газа в инертной пористой среде

представлен в [2]. Численные двумерные расчеты температурных и концентрационных полей, подтвержденные экспериментально, выполнены в [3] для случая горения метановоздушной смеси в прямоугольной горелке с крупнопористой инертной секцией. Нестационарное фильтрационное течение стехиометрической газовой смеси через пористый слой подчиняется закону Дарси и определяется как заданием перепада давления на внешних границах слоя, так и распределением давления внутри слоя. В ряде работ предполагается постоянство расхода газа [4–6], что позволяет не рассматривать уравнение движения газа. Иницирование горения для устройств, основанных на механизме фильтрационного горения газа, осуществляется в месте выхода газового потока из пористого слоя в результате импульсного кондуктивного подвода тепла или пилотного пламени к внешней поверхности каркаса — зажигание навстречу потоку. Условие постоянства расхода газа на этапе зажигания не выполняется при высокой скорости внешнего нагрева и низкой газопроницаемости конденсированного вещества.

В теории фильтрационного горения [1, 7] для описания гетерогенной системы применяются два подхода — однотемпературный и двухтемпературный. При моделировании фильтрационного горения металлов с образованием конденсированного продукта реакции [8] используется, как правило, однотемпературное приближение, что обусловлено, с одной стороны, сильным межфазным теплообменом и развитой межфазной поверхностью, а с другой — протеканием гетерогенной химической реакции. Фильтрационное горение газа харак-

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта СО РАН № 78.

теризуется более слабым межфазным теплообменом и значительным различием температур твердой и газовой фаз. В исследованиях фильтрационного горения газов предпочтение отдается двухтемпературным моделям.

В настоящей работе предлагается двухтемпературная модель горения газа в инертном пористом слое плоской формы, учитывающая распределение давления газа в порах. Целью исследования является определение режимов фильтрационного горения газа в пористом слое конечной толщины в зависимости от расхода газа, толщины слоя и параметров межфазного теплообмена.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая постановка задачи фильтрационного горения газа в инертной пористой среде в безразмерном виде представлена системой уравнений:

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = (1 - m)^{-1} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( (1 - m) \frac{\partial \theta_c}{\partial \xi} \right) - B_c(\theta_c - \theta_g); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_g}{\partial \tau} + v_g \frac{\partial \theta_g}{\partial \xi} = \rho_a \exp \frac{\theta_g}{1 + \text{Ar} \theta_g} + B_g \frac{1 - m}{m} (\theta_c - \theta_g); \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m \rho_i) + \frac{\partial}{\partial \xi} (m \rho_i v_g) = \text{Td} \rho_a \exp \frac{\theta_g}{1 + \text{Ar} \theta_g}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m \rho_a) + \frac{\partial}{\partial \xi} (m \rho_a v_g) = -\text{Td} \rho_a \exp \frac{\theta_g}{1 + \text{Ar} \theta_g}; \quad (4)$$

$$P = \rho_g (1 + \text{Ar} \theta_g); \quad (5)$$

$$v_g = -\text{Pe}_f \left( \frac{m}{1 - m} \right)^2 \frac{\partial P}{\partial \xi}; \quad (6)$$

$$\rho_g = \rho_a + \rho_i; \quad (7)$$

начальные и граничные условия:

$$\xi = 0: \quad \theta_c = \theta_w \quad (\tau < \tau_w);$$

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial \xi} = 0 \quad (\tau > \tau_w), \quad (8)$$

$$\xi = L: \quad \frac{\partial \theta_c}{\partial \xi} = \text{Bi}(\theta_c - \theta_0), \quad \theta_g = \theta_0, \quad \rho_a = \rho_n, \quad \rho_i = 0, \quad (9)$$

$$\tau = 0: \quad \theta_c = \theta_0, \quad \theta_g = \theta_0, \quad \rho_a = \rho_0, \quad \rho_i = 0. \quad (10)$$

Безразмерные переменные и параметры имеют вид:

$$\theta_c = \frac{T_c - T_*}{RT_*^2} E; \quad \theta_g = \frac{T_g - T_*}{RT_*^2} E;$$

$$\theta_0 = \frac{T_0 - T_*}{RT_*^2} E; \quad \theta_w = \frac{T_w - T_*}{RT_*^2} E;$$

$$\tau = \frac{t}{t_*}; \quad \tau_w = \frac{t_w}{t_*}; \quad \xi = \frac{x}{x_*};$$

$$\rho_a = \frac{\rho_{ac}}{\rho_g^*}; \quad \rho_i = \frac{\rho_{in}}{\rho_g^*}; \quad \rho_g = \frac{\rho}{\rho_g^*};$$

$$\rho_0 = \frac{\rho_a^0}{\rho_g^*}; \quad \rho_n = \frac{\rho_a^n}{\rho_g^*}; \quad p_* = \rho_g^* RT_*; \quad P = \frac{p}{p_*};$$

$$\text{Td} = \frac{c_c RT_*^2}{QE}; \quad t_* = \text{Td} k_0 \exp \left( -\frac{E}{RT_*} \right);$$

$$x_* = \sqrt{\frac{\lambda_c t_*}{c_c \rho_c}}; \quad \text{Ar} = \frac{RT_*}{E}; \quad B_c = \frac{3\alpha t_*}{R_0 c_c \rho_c};$$

$$B_g = \frac{3\alpha t_*}{R_0 c_g \rho_g^*}; \quad \text{Bi} = \frac{\alpha x_*}{\lambda_c}; \quad L = \frac{l}{x_*};$$

$$v_g = \frac{v t_*}{x_*}; \quad \text{Pe}_f = \frac{k_f c_c \rho_c p_*}{\lambda_c}.$$

При записи безразмерных величин использованы следующие размерные переменные:  $x, t$  — координата и время;  $T_0, T_c, T_g$  — начальная температура, температуры конденсированной и газовой фаз;  $T_w, t_w$  — температура и время действия накаливаемой поверхности;  $\rho_c, \rho_g, \rho_{ac}, \rho_{in}$  — плотности конденсированной фазы, газовой смеси, активного и инертного газов;  $\rho_a^0$ ,

$\rho_a^n$  — плотности газа в начальный момент времени и на входе в пористый слой (правая граница);  $m$  — пористость;  $\lambda_c$  — коэффициент теплопроводности конденсированной фазы;  $c_c, c_g$  — теплоемкости конденсированной и газовой фаз;  $v$  — скорость газа;  $p$  — давление газовой смеси;  $Q$  — тепловой эффект реакции;  $k_0, E, R$  — предэкспонент, энергия активации, газовая постоянная;  $k_f$  — коэффициент фильтрации;  $\alpha, \alpha_0$  — коэффициенты межфазного и внешнего теплообмена;  $R_0$  — характерный размер пор;  $l$  — толщина слоя. Масштабная температура и плотность газовой смеси приняты равными  $T_* = 1000$  К и  $\rho_g^* = 0.7$  кг/см<sup>3</sup>. Зависимость коэффициента фильтрации от пористости в законе Дарси (6) соответствует формуле Козени — Кармана [9].

Задача (1)–(10) решалась численно с использованием неявной схемы с конечными разностями против потока на разнесенной разностной сетке. Давление, температура и плотности фаз вычислялись в узлах, а скорость газа — между узлами сетки. Аппроксимационная сходимости проверялась в ходе расчетов на последовательности сгущающихся сеток. В ходе вычислений баланс масс газа, поступающего в поры из внешней среды, содержащегося в порах в начальный момент времени, потребленного и выделившегося в химической реакции, выполнялся с точностью до 1 %.

### СТАБИЛИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ ВНУТРИ ПОРИСТОГО СЛОЯ

Волна горения, формирующаяся на выходе газового потока из пористой среды, распространяется внутрь слоя (рис. 1). После отключения внешнего нагрева происходит стабилизация волны горения внутри пористого слоя. При низкой температуре конденсированной фазы и небольшой толщине слоя возможно неполное реагирование газовой смеси. Несгоревшая часть смеси выходит из пористого слоя и может полностью реагировать уже в газовой среде. Горение газа вне слоя в математической модели не рассматривается. Стационарный режим фильтрационного горения газа внутри слоя находится в процессе установления по времени рассчитываемых полей температур и концентраций, что соответствует сгущению линий на рис. 1. Результаты моделирования качественно соответствуют опытным данным. Количественное сопоставление затруднено отсутствием

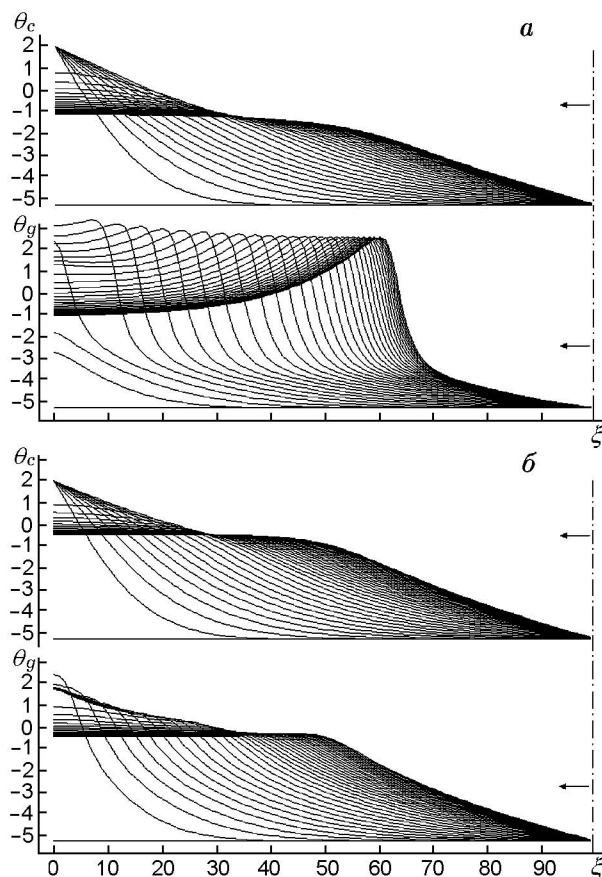


Рис. 1. Распределения температур конденсированной и газовой фаз с интервалом  $\Delta\tau = 100$  — от стадии зажигания до выхода на стационарный режим горения:

штрихпунктирной линией обозначена правая граница слоя, стрелками указано направление течения газа;  $\theta_0 = -5.4$ ,  $T_d = 0.156$ ,  $Ar = 0.12$ ,  $L = 100$ ,  $Re_f = 150$ ,  $\theta_w = 2$ ,  $\rho_0 = 4.4$ ,  $\rho_n = 5$ ,  $m_0 = 0.62$ ,  $\tau_w = 1000$ ; *a* —  $B_c = 0.001$ ,  $B_g = 0.5$ ; *b* —  $B_c = 0.016$ ,  $B_g = 8$

ем достоверных сведений об эффективных тепловых и химических константах.

Эксперименты проводили на горелке с плоским пористым слоем в виде диска диаметром 80 мм и толщиной 30 мм, размер пор 0.2 мм. В качестве горючего использовали стехиометрическую смесь метана с воздухом. Температурные характеристики горения регистрировали хромель-алюмелевыми термопарами, закрепленными на внешних поверхностях и в центре слоя.

При проектировании тепловых конверторов представляется важным исследование масштабного эффекта — зависимости рабочих параметров горелочного устройства (температу-

ры, потока излучения и др.) от его линейных размеров при условии сохранения расхода, начальной температуры и состава газовой смеси. С этой целью выполнялись расчеты с изменением толщины пористого слоя  $L$  при обратно пропорциональном изменении коэффициента фильтрации (или скачка давления) для сохранения расхода газа. Численное исследование показало, что варьирование ширины слоя в широком диапазоне не приводит к изменению температуры конденсированной фазы на выходе из нее газового потока. Соответственно не меняется интенсивность потока излучения. Сохранение расхода газа предполагает постоянную массовую скорость горения при условии, что газ реагирует в пористом слое полностью. Структура волны горения и структура зоны прогрева остаются неизменными. С увеличением толщины слоя растет ширина постреакционной зоны, в которой температуры конденсированной и газовой фаз равны. При уменьшении толщины слоя меньше критического удерживать горение внутри слоя не удается. После отключения внешнего нагрева ( $\tau > \tau_w$ ) происходит смещение зоны горения вниз по потоку с выходом фронта горения за границы слоя, что в рамках модели сопровождается снижением температуры каркаса до начальной температуры  $\theta_0$ .

Результаты численного исследования влияния коэффициента межфазного теплообмена на изменение структуры волны горения представлены на рис. 1. Отношение объемных теплоемкостей фаз, наряду с абсолютными значениями параметров межфазного теплообмена, является одним из определяющих режим работы горелки параметров. При сильном межфазном теплообмене температуры фаз различаются незначительно, распределение температуры по длине слоя монотонное. В случае слабого межфазного теплообмена и (или) высокой пористости слоя температура газа в зоне горения может быть на 1.5 ÷ 2 характерных интервала выше температуры конденсированной среды. Профиль температуры газа в этом случае будет немонотонным, с максимумом, соответствующим фронту горения. Распределение температуры в конденсированной фазе остается, как и в случае сильного межфазного теплообмена, монотонным, с минимальной температурой на входе и максимальной на выходе газа из слоя. Стабилизация зоны горения внутри пористого слоя, так же как и температура кар-

каса в точке выхода потока  $\xi = 0$ , зависит от отношения и абсолютных значений коэффициентов межфазного теплообмена  $B_c$  и  $B_g$ .

Измерения температуры в конденсированной фазе показали, что при увеличении расхода газа со стабилизацией волны горения внутри слоя максимальная температура пористой среды возрастает, а в центре и на входе в слой — падает (рис. 2). Численные расчеты позволяют дать следующее объяснение этому эффекту для случая слабого межфазного теплообмена, когда температуры фаз в зоне реакций отличаются на 1–2 характерных интервала, а диапазон изменения расхода выше критического. Критическое значение расхода, зависящее от параметров задачи, определяет границу, ниже которой горение в пористом слое при отключении внешнего нагрева становится невозможным и температура стремится к начальному значению  $\theta_0$ . Местоположение стационарного фронта горения с увеличением расхода газа смещается влево по потоку (рис. 3). Температура газа во фронте горения растет, так как увеличивается массовая скорость горения. Последние два фактора приводят к увеличению температуры конденсированного вещества на выходе газового потока из слоя. Вместе с этим, темпе-

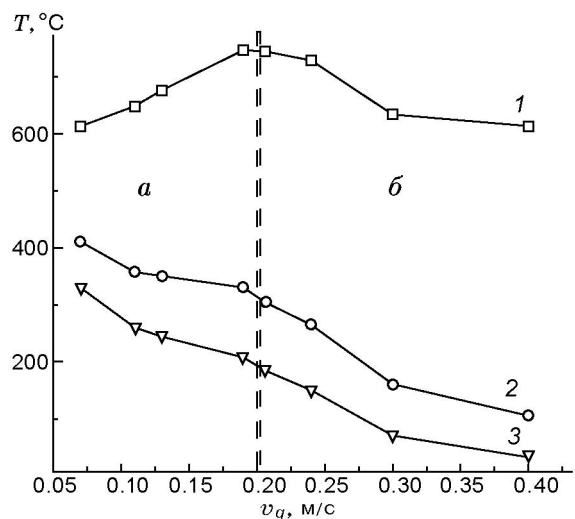


Рис. 2. Температура конденсированной фазы в стационарном режиме горения стехиометрической метановоздушной смеси в зависимости от скорости газа (эксперимент):

*a* — фронт горения локализован внутри пористого слоя, *б* — выход газового пламени из пористого слоя; 1 — температура конденсированной фазы на выходе потока, 2 — в центре слоя, 3 — на входе потока

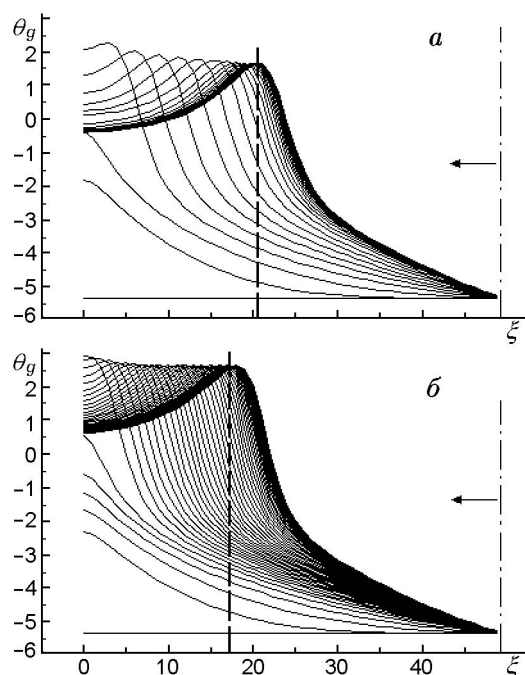


Рис. 3. Смещение зоны горения с изменением расхода газа:

штрихпунктирной линией отмечено положение фронта горения;  $\theta_0 = -5.4$ ,  $Td = 0.15$ ,  $Ar = 0.12$ ,  $L = 50$ ,  $B_c = 0.006$ ,  $B_g = 3$ ,  $\theta_w = 0$ ,  $\rho_0 = 4.4$ ,  $\rho_n = 5$ ,  $m_0 = 0.65$ ; *a* —  $Pe_f = 60$ ,  $\tau_w = 800$ , *б* —  $Pe_f = 85$ ,  $\tau_w = 1600$

ратуры газа и конденсированной фазы в центре слоя падают вследствие усиления конвективного теплообмена при возрастании скорости газового потока. Особенностью зажигания на выходе потока является необходимость увеличения времени внешнего нагрева  $\tau_w$  с ростом расхода газа для выхода на стационарный режим горения. Температура конденсированной фазы на входе потока всегда выше, чем температура газа. Превышение тем больше, чем меньше скорость газа. В случае сильного межфазного теплообмена с увеличением расхода температура по всей толщине пористого слоя растет, и объяснить опытные данные, представленные на рис. 2, не удастся. Вышесказанное является косвенным подтверждением наличия слабого межфазного теплообмена в экспериментах, соответствующих рис. 2, так как температуру газа непосредственно в порах измерить не удастся.

Численными расчетами показана принципиальная возможность существования автоколебательного режима фильтрационного горения газовой смеси (рис. 4). Температура фаз

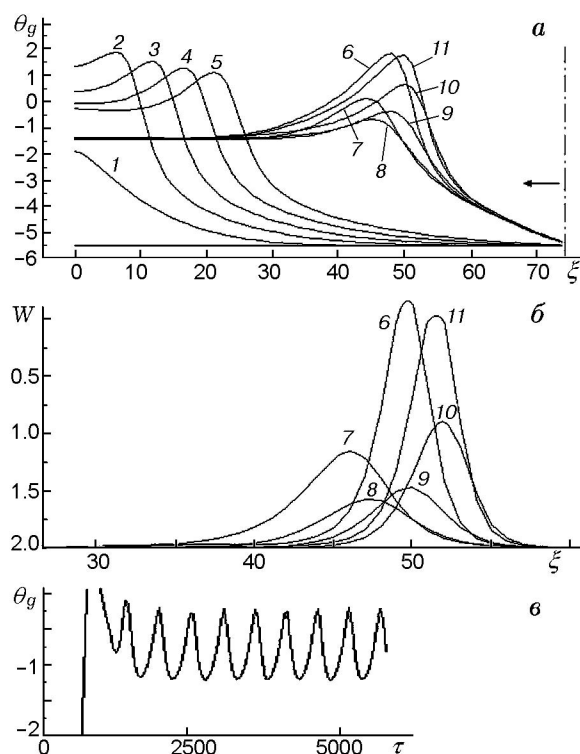


Рис. 4. Автоколебательный режим фильтрационного горения газа:

$\theta_0 = -5.5$ ,  $Td = 0.125$ ,  $Ar = 0.12$ ,  $L = 75$ ,  $Pe_f = 75$ ,  $B_c = 0.004$ ,  $B_g = 2$ ,  $\theta_w = 0$ ,  $\rho_0 = 4.5$ ,  $\rho_n = 5$ ,  $m_0 = 0.62$ ,  $\tau_w = 800$ ; *a* — распределения температуры газа, *б* — распределения функции тепловыделения  $W$ , *в* — зависимость температуры газа от времени в центре слоя;  $\tau$ : 1 — 200, 2 — 300, 3 — 400, 4 — 500, 5 — 600, 6 — 1500, 7 — 1600, 8 — 1700, 9 — 1800, 10 — 1900, 11 — 2000

в каждой точке слоя совершает колебания (с более высокой амплитудой для газовой фазы), обусловленные периодическими смещениями положения зоны горения внутри самого слоя. Изменению температуры газа и функции тепловыделения  $W = \rho_a \exp \frac{\theta_g}{1 + Ar\theta_g}$  в течение одного первого периода колебаний отвечают кривые 6–11 на рис. 4. Колебательные режимы наблюдались в экспериментах по горению пропановоздушной смеси в канале малого диаметра [10] и были обусловлены градиентом температуры стенок канала, нагретого извне. Численное исследование процессов периодического воспламенения и затухания пламени (FREI) выполнено в [11], где была показана возможность образования двух разнонаправленных фронтов химической реакции в горячей части канала. Эффективный диаметр ка-

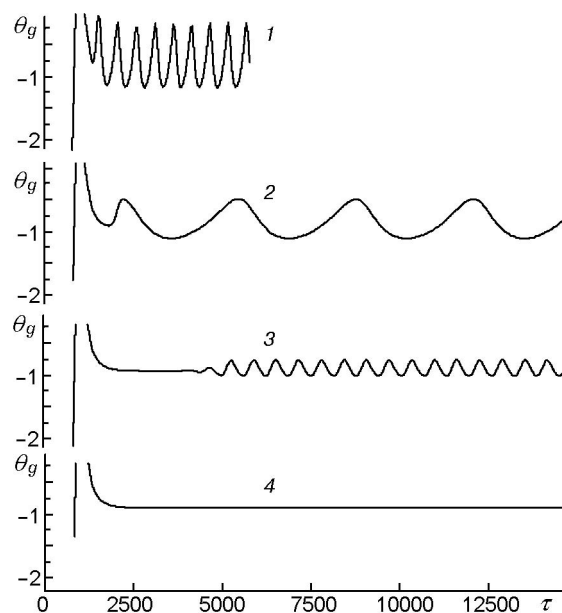


Рис. 5. Динамика температуры газа в центре пористого слоя в зависимости от расхода газа:

$\theta_0 = -5.5$ ,  $T_d = 0.125$ ,  $Ar = 0.12$ ,  $L = 75$ ,  $B_c = 0.004$ ,  $B_g = 2$ ,  $\theta_w = 0$ ,  $\rho_0 = 4.5$ ,  $\rho_n = 5$ ,  $m_0 = 0.62$ ,  $\tau_w = 800$ ; 1 —  $Re_f = 75$ , 2 —  $Re_f = 80$ , 3 —  $Re_f = 85$ , 4 —  $Re_f = 90$

нала (характерный размер пор) в горелке с пористым слоем имеет тот же диапазон значений порядка 1 мм, что и диаметр канала в работах [10, 11].

С выходом на стационарный или автоколебательный режим горения в конденсированной фазе устанавливается распределение температуры с наибольшим градиентом во входной части пористого слоя. Газовая смесь воспламеняется в прогретой части слоя, и пламя распространяется навстречу потоку газа. Температура во фронте горения (максимум функции тепловыделения) падает, но полного погасания пламени, как в [10], не происходит. Колебания температуры имеют четкую структуру и повторяемость, как на рис. 5. Такой режим фильтрационного горения, как и при нестационарном горении безгазовых систем [12], можно назвать автоколебательным. Обнаруженный режим определяется градиентом температуры в конденсированной фазе, который зависит от расхода газа и параметров межфазного и внешнего теплообмена. С уменьшением расхода амплитуда и частота колебаний возрастают. Колебания температуры конденсированной фазы с амплитудой, не превышающей  $10^\circ\text{C}$ , реги-

стрировались и в ходе экспериментов, но только при горении смесей, обогащенных метаном. Увеличение расхода газа в широком диапазоне изменения других параметров задачи приводит к стабилизации горения — переходу от автоколебательного к стационарному режиму работы горелки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально и теоретически исследовано фильтрационное горение газа в инертном пористом слое конечного размера в зависимости от расхода, межфазного теплообмена и толщины пористого слоя. Определены условия стабилизации фронта горения в слое и его характеристики. Обнаружен автоколебательный режим горения газа, вызванный снижением градиента температуры в конденсированной фазе с уменьшением расхода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алдушин А. П., Мержанов А. Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. — Новосибирск: Наука, 1988. — С. 9–52.
2. Abdul Mujeebu M., Abdullah M. Z., Abu Bakar M. Z., Mohamad A. A., Muhad R. M. N., Abdullah M. K. Combustion in porous media and its applications — A comprehensive survey // J. Environ. Management. — 2009. — V. 90. — P. 2287–2312.
3. Brenner G., Pickenacker K., Pickenacker O., Trimis D., Wawrzinek K., Weber T. Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methane/air combustion in porous inert media // Combust. and Flame. — 2000. — V. 123. — P. 201–213.
4. Лаевский Ю. М., Бабкин В. С. Стабилизированная волна горения газов в инертной пористой среде // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 5. — С. 8–15.
5. Чумаков Ю. А., Князева А. Г. Режимы сжигания газа в пористом теле теплогенератора цилиндрической формы // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 1. — С. 18–29.
6. Дробышев В. И. Численное исследование процессов горения в цилиндрической пористой горелке // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 3. — С. 17–21.
7. Добрего К. В., Жданок С. А. Физика фильтрационного горения газов. — Минск: ИТМО, 2002.
8. Грачев В. В. Режимы фильтрационного горения // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика. — Черногловка: Территория, 2001. — С. 70–93.

9. Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. Transport phenomena. — Wiley&Sons, 1960.
10. Рабинович О. С., Силенков М. А., Фатеев Г. А. Колебательные режимы горения газовой смеси в трубках малого диаметра // Инж.-физ. журн. — 1998. — Т. 71, № 4. — С. 579–583.
11. 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. — 2009. — Т. 45, № 2. — С. 12–19.
12. Мержанов А. Г., Хайкин Б. И. Теория волн горения в гомогенных средах. — Черноголовка: Изд-во ИСМАН, 1992.

*Поступила в редакцию 15/XII 2009 г.,  
в окончательном варианте — 10/II 2010 г.*

---