

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗА

Н. А. Какуткина¹, А. Д. Рычков²

¹Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, kktk@kinetics.nsc.ru

²Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090 Новосибирск

Проведено математическое моделирование нестационарных процессов фильтрационного горения газа при изменении параметров газового потока. Рассмотрены переходные процессы при резком изменении калорийности газовой смеси, скорости и направления течения газа. Проанализированы закономерности и механизмы изменения структуры волны фильтрационного горения газа и скорости ее распространения при различных типах переходных процессов. Установлено, что при внезапном изменении параметров газового потока пламя может скачком перенестись на большое расстояние в пористой среде. В дальнейшем в месте новой локализации пламени формируется волна фильтрационного горения газа, соответствующая измененным параметрам газового потока. Если запаса тепла в пористой среде недостаточно, переходный процесс заканчивается гашением. При изменении направления течения газа волна горения еще некоторое время продолжает распространяться в прежнем направлении, что может приводить к расплыванию высокотемпературной зоны в устройствах на основе реверс-процесса с гомогенной газофазной реакцией.

Ключевые слова: фильтрационное горение газа, пористая среда, нестационарные процессы горения.

ВВЕДЕНИЕ

Обширные теоретические и экспериментальные исследования стационарных бегущих волн фильтрационного горения газов (ФГГ) выявили ряд свойств, привлекательных с точки зрения практических применений [1–5]. Однако при создании практических горелочных устройств на основе ФГГ бегущие волны горения вступают в противоречие с требованием длительного времени работы при ограниченных размерах горелки. В широко известном реверс-процессе [6] это противоречие, в частности, разрешается периодическим изменением направления газового потока, которое влечет за собой изменение направления распространения волны горения. В результате, с одной стороны, реализуются полезные свойства бегущих волн, такие как сверхадиабатический эффект, а с другой стороны, нагретая зона локализуется в ограниченной области горелки за счет периодического изменения направления распространения волны ФГГ.

Волна ФГГ представляет собой сложный

комплекс, состоящий из сопряженных тепловой волны в пористой среде и волны газового горения. После изменения направления фильтрации газа происходит перестройка структуры волны ФГГ, которую будем называть переходным процессом. Благодаря высокой тепловой инерционности пористой среды переходный процесс может затягиваться на минуты и даже десятки минут. Закономерности таких переходных процессов являются важной информацией при проектировании реальных горелочных устройств. Переходные процессы, обусловленные изменением параметров течения горючей смеси (скорости газа, состава смеси), могут возникать также при оперативных переключениях в устройствах на основе ФГГ или в аварийных ситуациях. Некоторые из таких переходных процессов изучались экспериментально в [7].

Целью настоящей работы является изучение переходных процессов, обусловленных изменением характеристик газового потока. Для этого наиболее удобен метод численного моделирования, позволяющий оперативно отслеживать любые изменения характеристик волны горения.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-08-00123-а) и комплексного интеграционного проекта СО РАН и НАНУ № 60 (2009).

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Моделируемая система представляет собой трубу радиусом R_w , полностью или частично заполненную пористой средой. С одного конца в трубу втекает горючая смесь, а с другого выходят продукты сгорания. Волна горения предполагается плоской и одномерной, возможные эффекты искривления фронта не рассматриваются.

Система уравнений, описывающая распространение одномерной нестационарной волны горения в химически инертной пористой среде, состоит из уравнений переноса тепла по газу (1), пористой среде (2), переноса массы недостающего компонента газовой смеси (3), сохранения полного количества вещества в потоке (4) и уравнения состояния (5):

$$\varepsilon_g \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_g \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \alpha S_c (T_s - T) + Q \varepsilon_g \rho Y W, \quad (1)$$

$$\rho_s (1 - \varepsilon_g) c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left((1 - \varepsilon_g) \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \alpha S_c (T - T_s) + 2 \frac{\alpha_w}{R_w} (T_0 - T_s), \quad (2)$$

$$\varepsilon_g \rho \left(\frac{\partial Y}{\partial t} + v \frac{\partial Y}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_g \rho D \frac{\partial Y}{\partial x} \right) - \varepsilon_g \rho Y W, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_g \rho}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_g \rho v}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$\rho T = \text{const}. \quad (5)$$

Здесь T и T_s — температуры газа и инертной пористой среды, Y — относительная массовая концентрация недостающего компонента газовой смеси, v — скорость несущего газа, ρ и ρ_s — плотности газа и материала пористой среды, c_p и c_s — их удельные теплоемкости, λ , λ_s — коэффициенты теплопроводности, ε_g — пористость, α — коэффициент межфазного теплообмена, α_w — коэффициент внешней теплоотдачи, S_c — удельная поверхность пористой среды, D — коэффициент диффузии недостающего

компонента газовой смеси, $Q = c_p (T_b - T_0)$ — тепловой эффект реакции, T_b — адиабатическая температура горения газовой смеси, $W = k_0 \exp(-E/(RT))$ — скорость обобщенной одностадийной химической реакции, где k_0 — предэкспоненциальный множитель, E — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная.

Граничные условия для системы (1)–(5) задаются в следующем виде. На входной границе трубы: $v = v_{inp}(t)$, $T = T_{inp}$, $Y = Y_{inp}$, где индексом *inp* помечены входные значения скорости, температуры газа и концентрации недостающего реагирующего компонента в газовой смеси. На выходной границе задаются «мягкие» краевые условия: $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial Y}{\partial x} = 0$. Начальные условия ($t = 0$): $v = v_0(x)$, $T = T_0(x)$, $T_s = T_{s0}(x)$, $Y = Y_0$. Зажигание осуществляется открытым пламенем или прогретым участком пористой среды. Тип зажигания задается начальными профилями $T_0(x)$ и $T_{s0}(x)$. В случае зажигания открытым пламенем справа или слева в трубе остается участок, не заполненный пористой средой.

Метод численного решения системы подробно описан в [8]. Поскольку протяженность зоны горения очень мала, то для проведения достаточно точного расчета параметров течения в ней использовалась неравномерная адаптивная разностная сетка, максимальное сгущение которой соответствовало окрестности максимума функции тепловыделения в уравнении (1). По мере перемещения этого максимума разностная сетка перестраивалась. Для переинтерполяции параметров течения использовались локальные В-сплайны. Верификация программы проводилась путем ее тестирования на нескольких задачах с заведомо известными решениями [8].

Программа рассчитывает в каждый момент времени профили температуры газа и пористой среды, профиль концентрации топлива, профиль скорости газа и определяет координату зоны химической реакции. В программе предусмотрена возможность в заданный момент времени или с заданным периодом менять параметры газового потока — состав горючей смеси (задается адиабатической температурой горения), скорость и направление течения газовой смеси, что позволяет исследовать различные переходные процессы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Переходный процесс будем рассматривать как процесс изменения характеристик волны горения. Волна ФГГ представляет собой комплекс из тепловой волны в пористой среде и волны газового горения, которую будем отождествлять с пламенем (рис. 1). В качестве динамических характеристик волны фильтрационного горения могут быть использованы максимальные температуры газа (T_{\max}) и пористой среды ($T_{s,\max}$), координаты, соответствующие максимальным значениям температур газа (x_f) и пористой среды (x_s), их взаимное расположение, а также скорости распространения пламени (u) и тепловой волны в пористой среде (u_s). Последние определяются как dx_f/dt и dx_s/dt соответственно.

Переходные процессы при изменении калорийности смеси и скорости фильтрации

Эксперименты показывают, что переходные процессы при незначительных изменениях параметров газового потока, не приводящих к изменению направления распространения волны ФГГ, достаточно тривиальны и предсказуемы [7]. Расчеты подтверждают экспериментально обнаруженные закономерности таких переходных процессов. Поэтому здесь будут рассмотрены только переходные процессы, сопровождающиеся изменением направления движения волны.

Рис. 2 демонстрирует переходный процесс при мгновенном изменении содержания метана

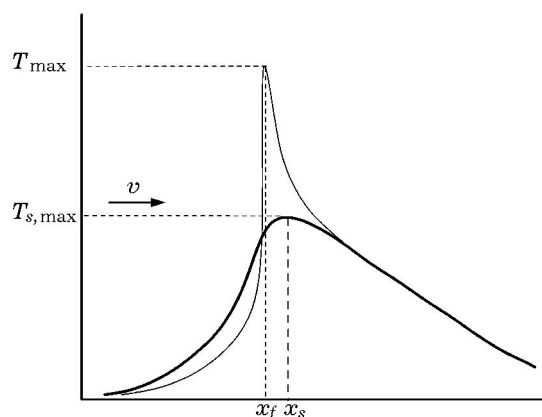


Рис. 1. Структура волны фильтрационного горения газа:

тонкая линия — профиль температуры газа, толстая — пористой среды

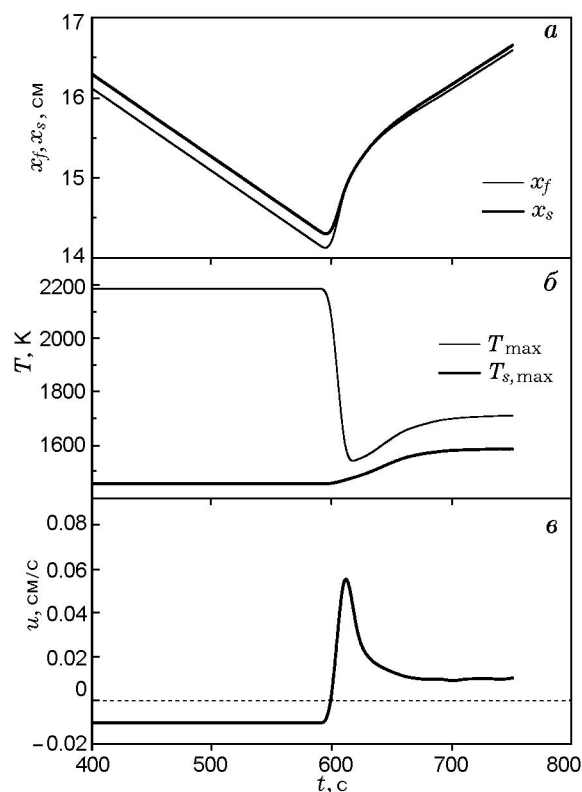


Рис. 2. Зависимости координат пламени и точки максимума температуры пористой среды (а), максимальных температур газа и пористой среды (б) и скорости распространения волны ФГГ (в) от времени при изменении параметров газовой смеси:

параметры газового потока: 9% CH_4 + воздух, $v = 0.2$ м/с ($t < 600$ с), 4% CH_4 + воздух, $v = 0.2$ м/с ($t > 600$ с)

в метановоздушной смеси от 9 до 4 %. В данном примере пористая среда представляет собой засыпку пористостью 0.45 из зерен карборунда со средним размером 2.5 мм. Длина трубы с пористой средой составляет 25 см. Особенностью этого переходного процесса является то, что стационарная волна фильтрационного горения 9%-й смеси — встречная, а 4%-й — спутная с потоком газа. Соответственно в переходном процессе должно измениться направление распространения волны. Волна фильтрационного горения 9%-й метановоздушной смеси инициировалась нагретым до 1500 К участком пористой среды, расположенным между координатами 20 и 24 см. Через несколько минут после инициирования сформировалась стационарная волна ФГГ, распространяющаяся со скоростью -0.010 см/с (рис. 2, в). За положи-

тельное направление принято распространение волны ФГГ слева направо. Знак минус перед значением скорости означает, что волна распространяется против потока газа. О стационарности сформировавшейся волны фильтрационного горения 9%-й смеси свидетельствует не только постоянное скорости распространения, но и постоянное расстояние между координатами x_f и x_s (рис. 2,а) и постоянство максимальных температур газа и пористой среды (рис. 2,б) вплоть до момента изменения состава смеси.

В момент времени $t = 600$ с вместо 9%-й смеси начинается подача 4%-й. При этом в структуре волны ФГГ (см. рис. 1) резко уменьшается высота газового пика на фоне тепловой волны в пористой среде и соответственно снижается температура пламени (см. рис. 2,б). Кроме того, газовый пик становится широким, т. е. химическая реакция становится распределенной. Если для 9%-й смеси ширина зоны реакции составляла доли миллиметра, то после перехода к 4%-й смеси она возрастает до $1 \div 2$ см. В приведенном примере значение T_{\max} падает более чем на 600 К, а высота газового пика сразу после смены смеси меньше 100 К. При этом «пламя» скачком перемещается по потоку газа в область максимума температуры пористой среды, что видно по слиянию координат x_f и x_s после изменения состава смеси. Такая перестройка структуры волны ФГГ, с одной стороны, позволяет минимизировать теплотери от реагирующего газа, а с другой стороны, обеспечивает дополнительный подогрев газа от пористой среды до момента зажигания, т. е. увеличивает энтальпию газа.

Стационарная волна фильтрационного горения 4%-й смеси в данной пористой среде при данной скорости фильтрации является спутной. Из-за малой калорийности газа для ее существования требуется более прогретая пористая среда, чем для 9%-й смеси. Переход к спутному направлению происходит из-за того, что при уменьшении тепловыделения кондуктивный поток тепла против потока газа на переднем фронте тепловой волны в пористой среде становится значительно меньше конвективного теплосъема за счет набегающего холодного газа. В результате передний фронт тепловой волны в пористой среде, а вместе с ним и вся волна ФГГ начинают распространяться по потоку газа (спутная волна) (см. рис. 2,б,в при $t > 600$ с). Режим спутной волны более эконо-

мичен, так как для поддержания горения эффективно используется тепло, ранее отданное пористой среде горячими продуктами сгорания газа. Ускоренное распространение волны ФГГ сразу после смены режима ($600 < t < 670$ с на рис. 2,а,в) позволяет использовать это тепло для прогрева пористой среды (рис. 2,б). По мере роста температуры пористой среды возрастает температура горения газа. При этом зона химических реакций сужается, выделяющееся тепло меньше размазывается по пространству и более эффективно расходуется на прогрев самого газа, что приводит к увеличению высоты газового пика (см. рис. 2,б). Переходный процесс заканчивается, когда устанавливается тепловое равновесие между волной газового горения и тепловой волной в пористой среде, т. е. формируется стационарная волна ФГГ.

Критическим моментом этого переходного процесса является разогрев пористой среды после перехода к низкокалорийной смеси. Критичность проявляется при увеличении скорости фильтрации 4%-й смеси. Большим скоростям фильтрации 4%-й смеси соответствуют большие максимальные температуры пористой среды в стационарной волне. Поэтому чем выше скорость фильтрации газа после перехода к 4%-й смеси, тем больше время формирования новой стационарной волны ФГГ. А начиная с $v = 0.6$ м/с стационарная волна после изменения состава смеси не формируется вообще, происходит гашение. Это обусловлено, вероятно, тем, что запаса тепла в волне горения, сформированной до перехода к 4%-й смеси, не хватает для требуемого прогрева пористой среды.

Рис. 3 демонстрирует обратный переходный процесс — от низкокалорийной (4%-я метановоздушная) смеси к высококалорийной (8%-я смесь). Здесь также наблюдается смена направления распространения, но на этот раз от спутной к встречной волне ФГГ. В данном примере пористая среда представляла собой засыпку из керамических шаров диаметром 6 мм. Скорость фильтрации 4%-й смеси составляла 0.3 м/с, а 8%-й — 0.2 м/с. Параметры подобраны такими, чтобы наиболее ярко показать особенности данного типа переходного процесса. Волна горения 4%-й смеси инициировалась нагретым до 1700 К участком пористой среды, расположенным между координатами 20 и 60 мм. Примерно через 4 мин сформировалась квазистационарная спутная волна ФГГ, распространяющаяся со скоростью $1.65 \cdot 10^{-2}$ см/с.

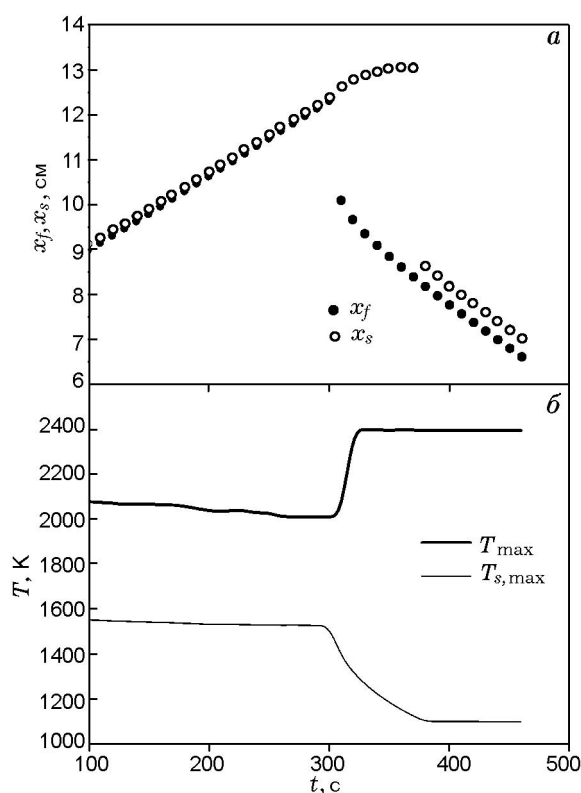


Рис. 3. Зависимости координат пламени и точки максимума температуры пористой среды (а) и максимальных температур газа и пористой среды (б) от времени при изменении параметров газовой смеси:

параметры газового потока: 4% CH_4 + воздух, $v = 0.3$ м/с ($t < 300$ с), 8% CH_4 + воздух, $v = 0.2$ м/с ($t > 300$ с)

В момент времени $t = 300$ с вместо 4%-й метановоздушной смеси начиналась подача 8%-й. Это привело к резкому увеличению температуры пламени (рис. 3, б). Моделирование показывает, что зажигание 8%-й смеси в первый момент ее подачи происходит не путем самовоспламенения в прогретой пористой среде, а непосредственно от пламени 4%-й смеси, т. е. в месте, где скорость пламени уравнивалась скоростью течения газа. Поскольку скорость пламени 8%-й смеси существенно превышает скорость течения газа в этом месте, пламя сносится против тока газа в область менее прогретой пористой среды (рис. 3, а). Расстояние перескока пламени составило около 2.5 см, а скорость пламени при перескоке возросла на два порядка и достигла значения 1 см/с. После перескока пламя стабилизируется в месте, где скорость течения газа уравнивается ско-

рость пламени 8%-й смеси. Здесь начинается быстрый локальный разогрев пористой среды за счет теплообмена с горящим газом. В месте прежнего положения пламени, напротив, пористая среда остывает. В результате возникает двугорбое распределение температуры: один максимум располагается в месте прежней локализации пламени 4%-й смеси, а второй — в месте новой локализации пламени 8%-й смеси. Некоторое время температура в прежнем максимуме остается выше, чем в новом. В случае, представленном на рис. 3, а, это около 70 с. Скачок координаты максимума T_s на рис. 3, а означает, что в этот момент времени температура пористой среды в новом максимуме стала выше, чем в старом, при этом расстояние между старым и новым максимумами составило ≈ 5 см.

Волна фильтрационного горения 8%-й смеси, как видно из рис. 3, а, встречная, т. е. после перескока пламя распространяется против потока газа. Этот режим менее экономичен, пористая среда прогревается хуже, и ее максимальная температура в стационарной волне фильтрационного горения 8%-й смеси ниже, чем для 4%-й. Поэтому $T_{s,max}$ падает в переходном процессе. Примерно через 1.5 мин после смены смеси основные динамические характеристики волны ФГГ становятся квазистационарными, и переходный процесс завершается.

Переходные процессы при изменении направления фильтрации газа

Рис. 4 демонстрирует переходный процесс при изменении направления течения газа без изменения состава смеси и скорости фильтрации. Этот тип переходного процесса представляет интерес в связи с попытками создания горелок на основе реверс-процесса с гомогенной газофазной реакцией [6]. Расчеты проведены для 6%-й смеси со скоростью течения газа на входе в пористую среду 0.4 м/с. Пористая среда такая же, как в первом примере. Иницирование волны ФГГ осуществлялось прогретым до 1700 К участком пористой среды между координатами 60 и 100 мм. Газ изначально поступал слева. Примерно через 3 мин после иницирования сформировалась квазистационарная волна ФГГ, распространяющаяся со скоростью $2.3 \cdot 10^{-3}$ см/с (рис. 4, б, в).

В момент времени $t = 360$ с направление течения газа сменилось на противоположное. Рис. 5 показывает изменение структуры

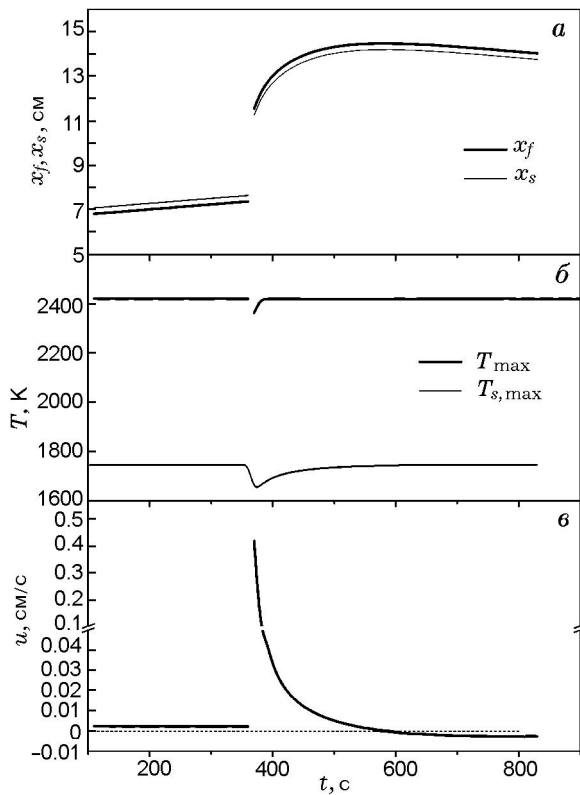


Рис. 4. Зависимости координат пламени и точки максимума температуры пористой среды (а), максимальных температур газа и пористой среды (б) и скорости распространения волны ФГГ (в) от времени при изменении направления фильтрации газовой смеси:

параметры газового потока: смесь 6% CH_4 + воздух, $v = 0.4$ м/с ($t < 360$ с), $v = -0.4$ м/с ($t > 360$ с)

волны ФГГ после смены направления фильтрации. Цифрой 1 обозначена структура волны в последний момент перед сменой направления. Эта структура типична для стационарной волны ФГГ. Пламя, как видно из рис. 4, а, находится на переднем фронте тепловой волны в пористой среде на расстоянии ≈ 3 мм от точки максимума температуры пористой среды. Затем газ начинает поступать справа. Проходя по нагретой пористой среде, он нагревается и загорается на расстоянии ≈ 4 см от прежнего положения пламени. На рис. 4, а это показано разрывом координаты пламени. Температура вновь зажженного пламени несколько ниже, чем раньше (рис. 4, б). Это обусловлено более низкой температурой пористой среды в месте локализации пламени. В свою очередь, причиной того, что пламя устанавливается при бо-

лее низкой температуре, является пологий температурный профиль пористой среды справа (рис. 5, профиль 1), что обеспечивает более эффективный прогрев газа и, как следствие, достижение температуры вспышки газа при более низкой температуре пористой среды.

Пористая среда в месте прежнего положения пламени начинает остывать, так как исчезает источник тепла, а в месте нового положения пламени, наоборот, быстро разогревается. В результате возникает переходный двугорбый профиль температуры (рис. 5, профиль 2). Сначала максимум температуры пористой среды находится в левом, остывающем горбе, поэтому после изменения направления фильтрации он уменьшается. Затем по мере разогрева пористой среды в месте новой локализации пламени максимум переходит в правый, растущий горб. В этот момент координата x_s претерпевает скачок, и максимум температуры пористой среды начинает расти (см. рис. 4, а, б). В приведенном примере уже через 10 с после смены направления он оказывается в месте нового положения пламени, а через минуту профиль температуры пористой среды становится монотонным (рис. 5, профили 3, 4). По мере разогрева пористой среды во втором горбе растет и температура пламени и примерно через 30 с достигает значения, которое было до смены направления фильтрации (см. рис. 4, б).

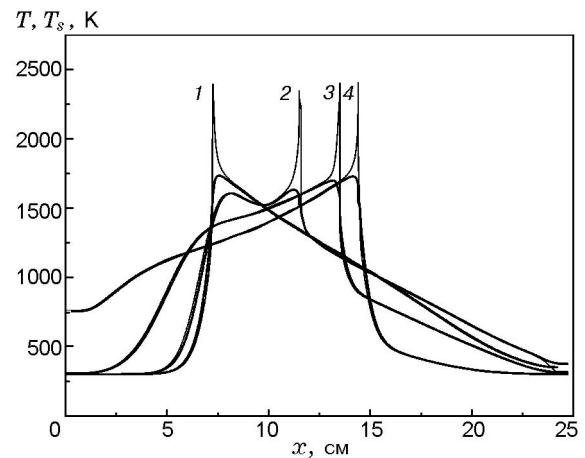


Рис. 5. Изменение профилей температуры газа (тонкие линии) и пористой среды (толстые линии) при изменении направления фильтрации газа:

параметры те же, что на рис. 4; время с момента иницирования, с: 360 (1), 370 (2), 420 (3), 540 (4)

Нетривиально, что после смены направления фильтрации газа волна ФГГ в течение еще 4 мин продолжает распространяться в прежнем направлении, т. е. против потока (см. рис. 4, а, в). Поскольку меняется только направление течения газа без изменения состава смеси и скорости ее течения, естественно было бы ожидать, что вновь зажженная волна тоже будет спутной, т. е. вместе с газом изменит направление распространения на противоположное. Однако это происходит не сразу вследствие длительности перестройки структуры волны ФГГ. Положение пламени на температурном профиле пористой среды определяется балансом массы газа, который сводится к равенству скорости горения и скорости течения в месте локализации пламени. Рост температуры пористой среды в области новой локализации пламени приводит к постепенному уменьшению теплопотерь от пламени и, соответственно, к увеличению скорости горения, которая становится больше скорости встречного потока газа в месте локализации пламени. В результате пламя сносится против потока в область меньших температур пористой среды (рис. 5, профили 2–4). Как видно из рис. 4, в, скорость сноса достигает 0.4 см/с, что более чем на два порядка превышает стационарную скорость волны при этих параметрах газа и пористой среды. Снос против потока продолжается до тех пор, пока растет температура пористой среды. Одновременно на этом этапе переходного процесса профиль температуры пористой среды становится более резким справа и пологим слева, т. е. стремится к зеркальному отражению профиля 1 на рис. 5. Этот процесс перестройки практически завершается через 7 мин после смены направления фильтрации. Волна горения снова становится спутной, а ее скорость устанавливается на уровне $-2.3 \cdot 10^{-3}$ см/с, т. е. по абсолютной величине совпадает со скоростью до смены направления (см. рис. 4, в).

Таким образом, полный переходный процесс при изменении направления фильтрации газа достаточно длительный — порядка 10 мин. В устройствах на основе реверс-процесса полуцикл обычно составляет $1 \div 2$ мин [6]. Это означает, что в реверс-процессе параметры волны ФГГ далеки от стационарных. Поэтому знание стационарных характеристик волн ФГГ не позволяет прогнозировать поведение волн горения в реверс-процессе. Вто-

рой важный результат проведенного моделирования в том, что после изменения направления фильтрации волна горения некоторое время продолжает двигаться в том же направлении, что и до смены направления фильтрации. При выборе достаточно малого периода реверс-процесса вместо локализации зоны горения это может привести к ее расплыванию. Кроме того, волна ФГГ на этом этапе переходного процесса является встречной к потоку газа. А из теории ФГГ известно, что встречные волны ФГГ энергетически менее выгодны, чем спутные, и не позволяют в полной мере реализовать идею сверхадиабатического горения, изначально заложенную в реверс-процессе [1]. Выбор оптимальных параметров реверс-процесса требует подробного моделирования с вариацией в широких пределах параметров системы.

ВЫВОДЫ

- При резком уменьшении калорийности газовой смеси, требующем смены направления распространения волны ФГГ от встречного к спутному, отмечены следующие явления: перенос пламени в область максимума температуры пористой среды с последующим быстрым движением в спутном направлении. Это движение сопровождается разогревом пористой среды с постепенным снижением скорости распространения до стационарной. Такой переходный процесс может закончиться гашением, если запаса тепла в исходной волне ФГГ окажется недостаточно для формирования стационарной волны ФГГ при новых параметрах системы.

- При переходах от спутной к встречной волне, вызванных резким увеличением энергии газового потока, пламя в момент смены параметров перескакивает против потока на большие расстояния порядка нескольких сантиметров. При этом образуется переходная структура волны ФГГ с двугорбым распределением температуры пористой среды. В эксперименте это выглядит как распад единой волны ФГГ на два отдельных очага, один из которых вскоре гаснет, а второй разгорается и формирует стационарную волну ФГГ, соответствующую новым значениям параметров системы.

- В переходном процессе при изменении направления фильтрации газа также образуются двугорбые переходные профили температуры пористой среды. Другое важное свойство состоит в том, что после смены направления фильтрации волна горения продолжает

еще некоторое время распространяться в прежнем направлении, которое в данном случае является встречным к потоку газа. Эта особенность может уменьшать эффективность гомогенного реверс-процесса и приводить к расплыванию зоны горения в устройствах на его основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лаевский Ю. М., Бабкин В. С.** Фильтрационное горение газа // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / ред. Ю. Ш. Матрос. — Новосибирск: Наука, 1988.
2. **Бабкин В. С., Лаевский Ю. М.** Фильтрационное горение газов // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 27–44.
3. **Babkin V. S.** Filtrational combustion of gases. Present state of affairs and prospects // Pure and Appl. Chem. — 1993. — V. 65, N 2. — P. 335–344.
4. **Доброго К. В., Жданок С. А.** Физика фильтрационного горения газов. — Минск: НАН Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, 2002.
5. **Доброго К. В., Жданок С. А.** Инженерный расчет характеристик фильтрационного горения на основе двухтемпературной одномерной модели // Инж.-физ. журн. — 1998. — Т. 71, № 3. — С. 424–432.
6. **Hoffman J. G., Echigo R., Yoshida H., Tada S.** Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system // Combust. Flame. — 1997. — V. 111. — P. 32–46.
7. **Какуткина Н. А., Мбарова М.** Переходные процессы при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 5. — С. 62–73.
8. **Какуткина Н. А., Коржавин А. А., Намятов И. Г., Рычков А. Д.** Закономерности распространения пламени через насадку коммуникационных огнепреградителей // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 4. — С. 23–38.

Поступила в редакцию 8/VII 2009 г.