

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОМ ГОРЕНИИ ГАЗОВ

Н. А. Какуткина, М. Мбарава*

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

*Tshwane University of Technology, X680, Претория 0001, ЮАР

Экспериментально исследовано поведение волн фильтрационного горения газа в режиме низких скоростей при изменении параметров газового потока и пористой среды. Показано, что в переходных процессах может произойти гашение или сформироваться стабильная структура волны горения, не соответствующая ни начальным, ни конечным условиям. Обнаружен нетривиальный тип переходного процесса, сопровождающийся пространственным переносом зоны горения.

Ключевые слова: горение, метан, фильтрационное горение.

Фильтрационное горение газа (ФГГ) в режиме низких скоростей обладает рядом свойств, привлекательных с точки зрения практики. Процесс внутренней рекуперации тепла, реализующийся при ФГГ, позволяет сжигать топливные смеси с недостатком энергии [1], которые не могут быть использованы в традиционных методах сжигания. Тепловая инерционность пористой среды обуславливает повышенную устойчивость процесса горения по сравнению с обычными пламенами. Многопараметричность процесса ФГГ обеспечивает легкость управления им с целью получения заданных характеристик горения.

Перечисленные преимущества стимулируют разработку практических устройств на основе ФГГ. Горелочные устройства на основе ФГГ могут быть созданы в варианте стабилизированной зоны горения [2, 3] или в варианте бегущей волны [4]. Стабилизация зоны горения может быть достигнута при использовании сферических или цилиндрических волн горения, обладающих свойством автостабилизации [5–7]. Другой способ стабилизации состоит в использовании нескольких слоев пористых сред, отличающихся физико-химическими свойствами [2]. Реализация этого способа требует исследования поведения волн ФГГ в слоистых системах.

В бегущей волне ФГГ, спутной с потоком газа, реализуется эффективный цикл рекуперации тепла, позволяющий сжигать низкокалорийные топлива [1]. В практических устройствах осуществление режима бегущей волны

вступает в противоречие с требованием ограниченности размеров горелки. Это противоречие разрешается периодическим изменением направления и, возможно, скорости фильтрации газа, которое реализуется в реверс-процессе [4]. Разработка таких устройств требует исследования поведения волн ФГГ в условиях переменной скорости фильтрации. Поскольку характеристики волны ФГГ являются функциями параметров пористой среды, распространение волны ФГГ в слоистой системе или в условиях переменной скорости фильтрации должно сопровождаться переходными процессами.

Стационарные волны ФГГ в режиме низких скоростей изучены достаточно подробно. Однако имеющиеся в литературе данные не позволяют даже качественно предсказать поведение волн горения при изменении каких-либо параметров системы. Предметом исследований в настоящей работе являются переходные процессы при ФГГ в режиме низких скоростей.

ТИПЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Под переходным процессом будем понимать процесс изменения структуры и характеристик волны горения при изменении определяющих параметров системы. Волна ФГГ состоит из двух связанных тепловых волн: в пористой среде и в газе [1, 8] (рис. 1). В неадиабатической системе тепловая волна в каркасе имеет два фронта: передний — со стороны свежей смеси (a_1) и задний — со стороны продуктов сгорания (a_2). В стационарной волне оба фронта движутся с одинаковой скоростью, равной скорости распространения волны как це-

Работа выполнена при частичной поддержке Фонда Коперникус (контракт № ICA-2-СТ-2000-100035).

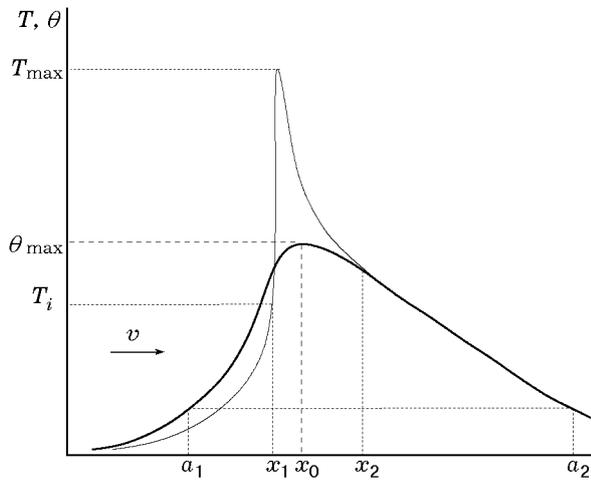


Рис. 1. Схема волны фильтрационного горения газа

лого. В нестационарном режиме, в частности в переходных процессах, фронты распространяются по разным законам, что приводит к расплыванию или сужению тепловой волны. Поэтому переходный процесс можно характеризовать временными зависимостями координаты или скорости распространения переднего и заднего фронтов тепловой волны в каркасе.

Переходные процессы возникают при изменении любого из определяющих параметров системы. Определяющими параметрами при ФГГ являются характеристики газовой смеси — состав смеси и вектор скорости ее фильтрации через пористую среду, а также характеристики пористой среды — пористость, средний размер зерна, химическая активность по отношению к горючему газу, теплофизические характеристики материала пористой среды (плотность, теплоемкость, теплопроводность) [1].

В данной работе исследуется результат переходного процесса (достижение стационарных характеристик волны, соответствующих конечным значениям параметров системы, гашение или установление нового стационарного состояния) и характер перехода (монотонный, скачкообразный, колебательный).

ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема установки приведена на рис. 2. Горелка представляет собой вертикальную кварцевую трубу длиной 500 мм с внешним диаметром 50 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Труба

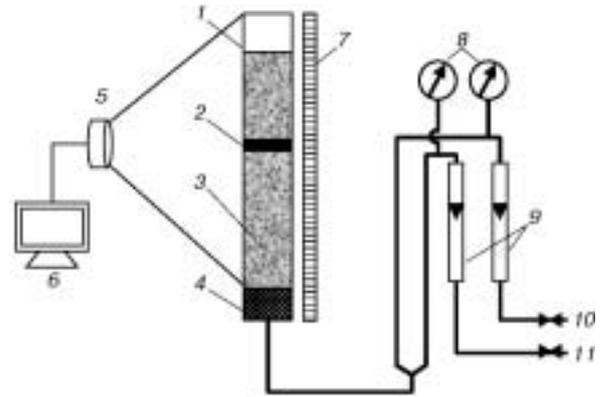


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — кварцевая труба, 2 — зона горения, 3 — пористая среда, 4 — огнепреградитель, 5 — web-камера, 6 — компьютер, 7 — линейка, 8 — манометры, 9 — расходомеры, 10, 11 — вход горючего газа и воздуха

заполнялась пористой средой, в качестве которой использовались зернистый карборунд, отсеянный на ситах с размерами ячеек $2 \div 3$ мм, и керамические шары диаметром 6,5 мм. В дальнейшем будем называть эти пористые среды соответственно мелкой и крупной. Их теплофизические характеристики приведены в табл. 1. В зависимости от характера исследуемого переходного процесса труба либо полностью заполнялась пористой средой одного типа, либо заполнялась средами двух типов с четко различимой границей между ними. С внутренней стороны труба изолировалась слоем асбеста толщиной ≈ 2 мм для предотвращения разрушения кварца в циклах нагрева и охлаждения в результате различных коэффициентов теплового расширения кварца и наполнителя. Снаружи труба теплоизолировалась асбестовым одеялом толщиной 2 см. В слоях изоляции была оставлена щель вдоль всей трубы шириной ≈ 5 мм для визуальных наблюдений за процессом горения.

В качестве горючего газа использовался природный газ, содержащий 96 % метана, 1,5 % этана, 0,7 % пропана, 0,3 % бутана, 0,04 % углекислого газа и 1,0 % азота. Горючие смеси составлялись по расходам природного газа и воздуха. Расходы измерялись образцовыми ротаметрами с учетом перепада давления в системе, измеряемого манометрами. Газ смешивался с воздухом до входа в горелку. Смесь подавалась в трубу снизу. Горючая смесь зажигалась в верхней части трубы открытым пламенем. Пламя прогревало верхний слой пористой

Таблица 1

Теплофизические свойства пористых сред

Свойства	Крупная среда (керамика)	Мелкая среда (карборунд)
Плотность (ρ_s), кг/м ³	2 400	3 100
Теплоемкость (c_s), Дж/(кг·К)	1 090	840
$c_s \rho_s (1 - m)$, Дж/(м ³ ·К)	$1,67 \cdot 10^6$	$1,43 \cdot 10^6$
Теплопроводность ($\lambda_{s,0}$), Вт/(м·К)	1,0	11,7
Средний размер зерна (d), м	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Пористость (m)	0,36	0,45
Удельная поверхность (S_c), м ⁻¹	553	1 000

среды, формируя волну горения. Меняя параметры газовой смеси, волну горения вводили в нужный участок горелки. Затем устанавливались исследуемые параметры газовой смеси и запускалась система регистрации.

Распространение волны горения регистрировалось с помощью цифровой web-камеры, соединенной с персональным компьютером. Волна горения фотографировалась автоматически через равные промежутки времени (от 20 до 100 с) с запоминанием в памяти компьютера. Для определения координат волны горения рядом с горелкой устанавливалась масштабная линейка, так чтобы координата переднего фронта всегда была меньше, чем заднего. Полученные снимки в дальнейшем обрабатывались с использованием прикладной программы, позволяющей определять координаты объектов на изображениях. Координаты переднего (a_1) и заднего (a_2) фронтов волны горения (см. рис. 1) определялись по произвольно выбранному, но одинаковому уровню свечения (соответствующим температуре пористой среды $500 \div 700$ °С). В результате обработки получались траектории движения переднего (темные символы) и заднего (светлые символы) фронтов волны горения (рис. 3–7). В тех случаях, когда устанавливалась стационарная волна горения, на стационарном участке траектории определялась скорость распространения волны горения, диапазон ее изменения $u = -5 \cdot 10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-4}$ м/с (скорость положительна для спутной с потоком газа волны горения и отрицательна — для встречной). Среднеквадратичное отклонение измеренных значений u составляло $\pm 1,2 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Эпизодически проводились измерения распределения температуры в волне горения. Для этого по оси трубы в пористую среду была введена закрытая снизу керамическая трубка с внешним диаметром 3 мм. В трубку вводилась хромель-алюмелевая термопара с толщиной слоя 100 мкм, которая могла перемещаться вдоль трубки. Показания термопары регистрировались с помощью цифрового вольтметра.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Переходные процессы при изменении характеристик газовой смеси

Рис. 3 иллюстрирует переходные процессы при изменении параметров газовой смеси. Такие изменения скорости фильтрации, как на рис. 3,а, не приводят к изменению направления распространения волны. На рис. 3,б представлены примеры переходных процессов с изменением направления распространения волны горения. По данным рис. 3 можно отметить следующие закономерности переходных процессов. С изменением скорости фильтрации v или состава смеси происходит изменение толщины тепловой волны в каркасе δ (δ определяется как разность координат переднего и заднего фронтов волны). При этом траектория движения переднего фронта, как правило, лишь меняет наклон и фронт сразу начинает распространяться со стационарной скоростью, соответствующей новым условиям. Траектория движения заднего фронта после изменения параметров газового потока претерпевает скачкообразные изменения в соответствии с увеличением или уменьшением толщины слоя

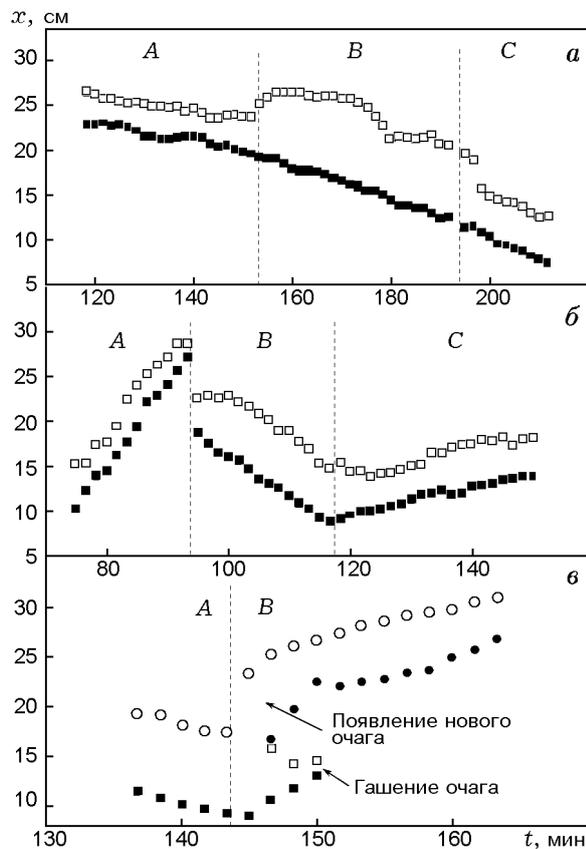


Рис. 3. Переходные процессы при изменении параметров газовой смеси:

темные значки — траектория движения переднего фронта волны горения, светлые значки — заднего фронта; *a* — крупная пористая среда, 7 % CH_4 +воздух, скорость фильтрации: *A* — 29 см/с, *B* — 68 см/с, *C* — 48 см/с; *b* — крупная пористая среда, концентрация метана: *A* — 4 %, *B* — 8 %, *C* — 5 %, скорость фильтрации: *A* — 66 см/с, *B* — 49 см/с, *C* — 47 см/с; *v* — мелкая пористая среда, концентрация метана: *A* — 9 %, *B* — 4 %, скорость фильтрации: *A* — 39 см/с, *B* — 68 см/с

прогретой пористой среды. Спустя некоторое время релаксации τ задний фронт переходит на стационарную траекторию, параллельную траектории переднего фронта, что свидетельствует о формировании стационарной волны горения, соответствующей новым параметрам газового потока. Характерные времена перестройки структуры волны горения при изменении параметров газового потока, как следует из рис. 3, *a, б*, составляют 5 ÷ 15 мин.

Интересный эффект наблюдается в первом переходном процессе, показанном на рис. 3, *б*. После изменения параметров газового потока волна горения не просто меняет направление

распространения, но и очень быстро, почти скачкообразно, переносится против потока сразу на 8 см.

Нетривиальный тип переходного процесса демонстрирует рис. 3, *в*. После изменения параметров газовой смеси передний фронт изменяет направление распространения и начинает двигаться стационарно. Задний фронт быстро (за время ≈ 1 мин) перемещается на 6 см вниз по потоку. Затем в той части, куда переместился задний фронт, формируется второй очаг яркого свечения, т. е. волна горения распадается на два очага, расположенных один под другим. В дальнейшем изначально более яркий очаг, расположенный вверх по потоку, гаснет, а второй очаг, наоборот, разгорается, формируя стационарную волну горения. Такой тип переходного процесса наблюдается при переходах на очень бедные, как правило, запредельные в условиях обычных пламен, газовой смеси.

Переходные процессы при изменении характеристик пористой среды

Еще большее разнообразие переходных процессов наблюдается при переходе волны горения через границу пористых сред разной дисперсности. Здесь характер и исход переходного процесса зависят от того, происходит ли переход в спутном или встречном направлении, из крупной в мелкую пористую среду или наоборот, существенны также уровень калорийности газовой смеси и скорость фильтрации.

Переходы из мелкой в крупную пористую среду в спутном и встречном направлениях, а также переходы встречной волны из крупной в мелкую пористую среду подчиняются единым законам. Координата переднего фронта при переходе через границу сред непрерывна. Распространение переднего фронта стационарно в обеих средах, скорость стационарного распространения переднего фронта меняется при пересечении границы сред. Толщина волны в крупной пористой среде больше, чем в мелкой. Изменение толщины происходит за счет ускоренного движения заднего фронта. При этом задний фронт ускоряется при переходе спутной волны из мелкой в крупную пористую среду (рис. 4) и при обратном переходе встречной волны (рис. 5). При переходе встречной волны из мелкой в крупную пористую среду, напротив, наблюдается замедление движения заднего фронта при пересечении границы сред.

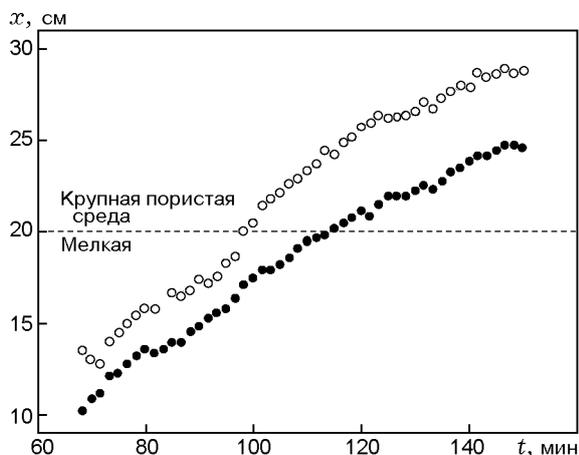


Рис. 4. Переход спутной волны горения из мелкой в крупную пористую среду:

концентрация метана 5 %; скорость фильтрации в крупной пористой среде 57 см/с, в мелкой — 46 см/с

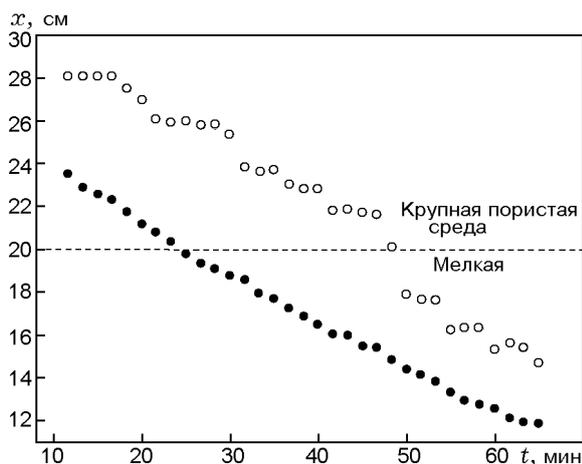


Рис. 5. Переход встречной волны горения из крупной в мелкую пористую среду:

концентрация метана 7 %; скорость фильтрации в крупной пористой среде 58 см/с, в мелкой — 46 см/с

Закономерности переходов спутных волн из крупной в мелкую пористую среду зависят от калорийности газовой смеси и скорости фильтрации. Рис. 6 демонстрирует изменение переходного поведения спутных волн с изменением скорости фильтрации для относительно высококалорийной газовой смеси (6 % метана). При больших скоростях фильтрации иногда наблюдается незначительная задержка волны на границе сред, как на рис. 6, а. При уменьшении скорости фильтрации задержка становится явно выраженной и длительной. Так, на рис. 6, б волна стояла на границе сред около

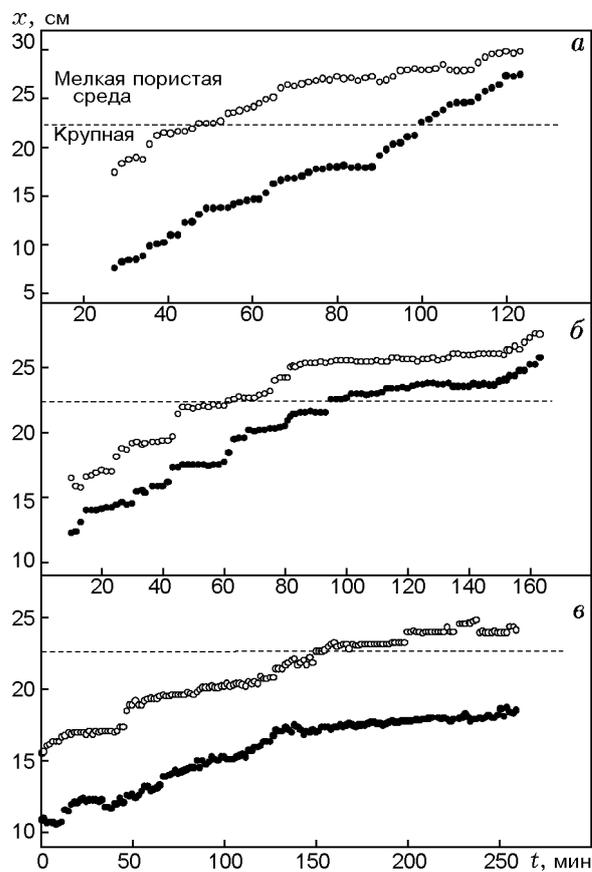


Рис. 6. Переходы спутной волны горения из крупной в мелкую пористую среду:

концентрация метана 6 %; скорость фильтрации в крупной пористой среде: а — 115 см/с, б — 96 см/с, в — 86 см/с; скорость фильтрации в мелкой пористой среде: а — 92 см/с, б — 77 см/с, в — 69 см/с

50 мин, затем оторвалась от границы и начала распространяться со скоростью, близкой к скорости стационарной волны в мелкой пористой среде. При дальнейшем уменьшении скорости фильтрации тенденция стабилизации волны на границе сред усиливается. Так, на рис. 6, в практически стабилизированная на границе волна горения наблюдалась в течение 2 ч, после чего эксперимент был прекращен. Экстраполяция траектории переднего фронта позволяет оценить, что полного перехода волны горения в мелкую пористую среду можно было бы ожидать только через 9 ч.

При уменьшении калорийности газовой смеси переходное поведение волн усложняется (рис. 7). При 4 %-м содержании метана в смеси и низкой скорости фильтрации горение затухает, когда задний фронт волны углубляется в мелкую пористую среду примерно на 1 см

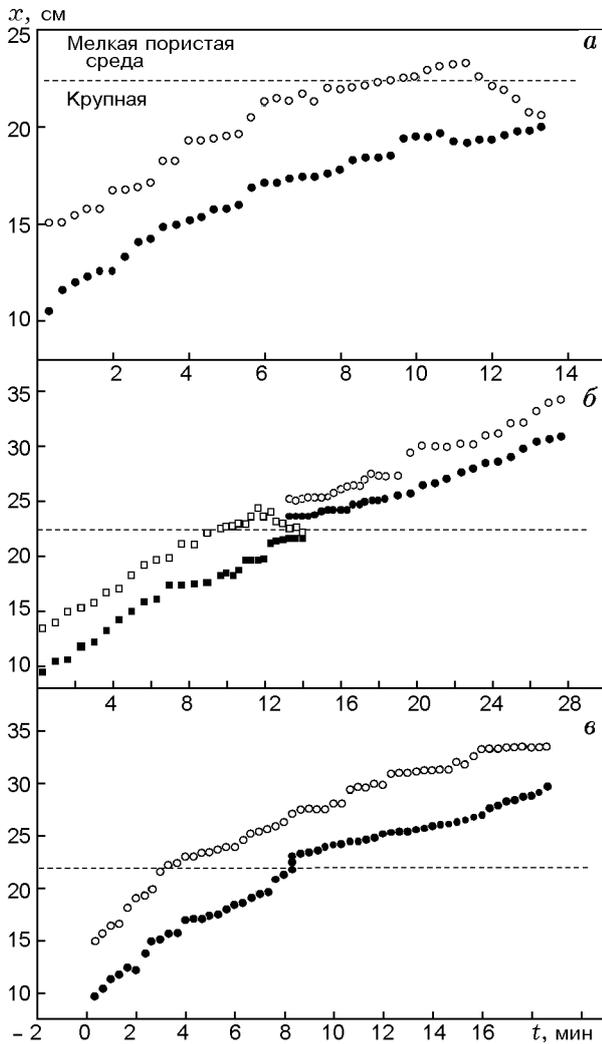


Рис. 7. Переходы спутной волны горения из крупной в мелкую пористую среду:

концентрация метана 4 %; скорость фильтрации в крупной пористой среде: а — 85 см/с, б — 94 см/с, в — 113 см/с; скорость фильтрации в мелкой пористой среде: а — 68 см/с, б — 75 см/с, в — 90 см/с

(рис. 7,а). Отметим при этом, что данная скорость фильтрации лежит в пределах области существования стационарной волны в мелкой пористой среде, в которую волна пытается перейти, т. е. гашение обусловлено наличием границы сред на пути распространения волны.

При увеличении скорости фильтрации волна горения 4 %-й смеси преодолевает границу сред без затухания. Пример такого перехода показан на рис. 7,б. Он происходит по следующему сценарию. Задний фронт без задержки на границе переходит в мелкую пористую среду. Когда волна примерно наполовину своей толщины переходит во вторую среду, она рас-

падает на два очага. Первый очаг, расположенный полностью в крупной пористой среде, в дальнейшем гаснет, так же как и в предыдущем примере. Второй очаг, образовавшийся в мелкой среде, разгорается и далее распространяется в ней со скоростью, соответствующей стационарному режиму в этой среде.

При еще большей скорости фильтрации ярко выраженного распада волны на два очага не наблюдается. Вместо этого регистрируется одномоментное «перепрыгивание» переднего фронта волны из крупной в мелкую пористую среду (рис. 7,в).

ОБСУЖДЕНИЕ

Закономерности переходных процессов изучались по траекториям движения переднего и заднего фронтов тепловой волны в каркасе. Поэтому интерпретацию полученных результатов естественно проводить с точки зрения ожидаемых трансформаций структуры тепловой волны при соответствующих переходному процессу изменениях параметров газового потока и пористой среды.

В общем случае скорости распространения фронтов и профиль температуры волны определяются тремя процессами: кондуктивным переносом тепла в пористой среде, конвективным теплообменом с газом и теплопотерями во внешнюю среду. Полный баланс тепла в стационарной волне в режиме низких скоростей, записанный в системе координат, движущейся с волной горения, описывается соотношением [1]

$$\lambda_s \frac{d^2\theta}{dx^2} + c_s \rho_s u \frac{d\theta}{dx} - c_g G \frac{m}{1-m} \frac{dT}{dx} - \frac{\alpha_e}{1-m} (\theta - T_0) - QG \frac{m}{1-m} \frac{d\eta}{dx} = 0. \quad (1)$$

Здесь θ и T — температуры каркаса и газа соответственно, T_0 — температура внешней среды, η — относительная концентрация недостающего компонента газовой смеси, G — массовый расход газа, Q — тепловой эффект реакции, α_e — коэффициент внешнего теплообмена, u — скорость волны горения, x — координата, остальные обозначения ясны из табл. 1.

Разобьем всю область тепловой волны в каркасе на три зоны, как показано на рис. 1. Координата x_1 соответствует точке, где кончается инертный подогрев газовой смеси и происходит ее воспламенение, x_2 — координата, где

сравниваются температуры газа и каркаса. Тогда зона I ($x < x_1$) представляет собой область переднего фронта тепловой волны в каркасе, зона III ($x > x_2$) — область заднего фронта, зона II ($x_1 < x < x_2$) — область тепловыделения и интенсивного межфазного теплообмена. В зоне I на профиль температуры главным образом влияют конвективное охлаждение каркаса набегающим холодным потоком газа и прогрев за счет кондуктивного притока тепла из зоны II. В зоне III каркас и газ охлаждаются за счет внешних теплопотерь. Считая, что температуры газа и каркаса существенно отличаются только в зоне II, и интегрируя (1) в однотемпературном приближении по зонам I и III с граничными условиями на концах $\theta = T_0$, $d\theta/dx = 0$ при $x = \pm\infty$, оценим толщины этих зон:

$$\delta_I = \frac{\lambda_s}{c_g G m / (1 - m) - c_s \rho_s u}, \quad (2)$$

$$\delta_{III} \approx \frac{c_g G m - c_s \rho_s u (1 - m)}{\alpha_e}. \quad (3)$$

Согласно оценкам, проведенным для типичных значений параметров экспериментов, толщина зоны I примерно в 20 раз меньше, чем толщина зоны III. Зарегистрированные в экспериментах профили температуры каркаса показывают, что толщина зоны I в 7–10 раз меньше, чем толщина зоны III, и обычно не превышает $1 \div 1,5$ см.

Профиль температуры каркаса в зоне II формируется за счет притока тепла от газа межфазным теплообменом и оттока тепла за счет теплопроводности по каркасу в зону I и, в меньшей степени, в зону III. Из общих соображений ясно, что ширина этой зоны растет с увеличением расхода газа. В мелкой пористой среде ширина зоны II должна быть меньше из-за более интенсивного межфазного теплообмена.

Существенным параметром тепловой структуры волны в режиме низких скоростей является относительное расположение тепловых волн в каркасе и газе (см. рис. 1). Теоретически показано, что в стационарной волне в режиме низких скоростей пик температуры в газовой фазе располагается на переднем фронте тепловой волны в каркасе [1, 8]. В переходных процессах возможно любое текущее расположение тепловых волн относительно друг друга, которое в общем случае

определяется условием массового баланса на фронте пламени.

Рассмотрим переходные процессы при изменении параметров газового потока. Общим свойством всех наблюдаемых переходных процессов является более резкое изменение координаты заднего фронта при непрерывности координаты переднего фронта (см. рис. 3). Различие в поведении переднего и заднего фронтов, очевидно, обусловлено их различным расположением относительно зоны тепловыделения в газе. Изменение скорости движения заднего фронта, расположенного вниз по потоку от зоны тепловыделения, обусловлено, с одной стороны, смещением самой зоны тепловыделения и, с другой стороны, изменением скорости тепловыделения, обусловленным изменением параметров потока. Скорость тепловыделения определяется произведением калорийности газовой смеси на скорость фильтрации. Поэтому увеличение скорости фильтрации или содержания метана в смеси приводит к смещению заднего фронта относительно переднего вниз по потоку, а уменьшение — наоборот, вверх по потоку.

Координата переднего фронта в большинстве случаев не претерпевает резких изменений при варьировании параметров газовой смеси. Это обусловлено тем, что ширина этой зоны ($1 \div 1,5$ см) соизмерима с разбросом экспериментальных точек на траекториях фронтов ($5 \div 7$ мм) и любые ее изменения также оказываются в пределах разброса. Исключение составляет только первый переходный процесс на рис. 3, б, в котором передний фронт скачком переместился на 8 см против потока. Скорее всего, скачок координаты переднего фронта в этом случае является результатом «проскока» пламени, т. е. перехода горения из режима низких скоростей в режим высоких скоростей. 9 %-я смесь, как показывают эксперименты, способна гореть в такой пористой среде в режиме высоких скоростей. 8 %-я смесь является пограничной между двумя режимами, поэтому даже незначительного подогрева каркаса, обусловленного предшествующим горением 4 %-й смеси, достаточно для проскока. Стабилизация волны горения после проскока происходит либо за счет увеличения теплопотерь из газа в холодной части каркаса, либо за счет неоднородностей упаковки пористой среды. Очевидно, что в этом случае изменение координаты переднего фронта достигается не за счет изме-

Таблица 2

Скорости волны горения, измеренные в переходных процессах (u)
и в однородных пористых средах ($u_{стац}$)

Концентрация метана, %	Расход газа, л/с	Крупная среда (керамика)			Мелкая среда (карборунд)			Номер рисунка
		v , см/с	$u_{стац}$, см/с	u , см/с	v , см/с	$u_{стац}$, см/с	u , см/с	
7	0,32	58,0	-0,004	-0,0031	46,4	-0,0032	-0,0037	5
6	0,64	114,8	0,0033	0,0029	91,9	0,0032	0,0035	6,а
6	0,53	95,7	0,0017	0,0019	76,5	0,0022	0,0022	6,б
6	0,48	86,1	0,0008	0,0008	68,9	0,0018	—	6,в
5	0,32	56,9	0,0023	0,0023	45,5	0,0057	0,0037	4
4	0,47	84,5	0,0125	0,0132	67,6	0,0116	—	7,а
4	0,52	93,9	0,0149	0,0099	75,1	0,0110	0,0110	7,б
4	0,62	112,7	0,0195	0,032	90,1	0,0130	0,0099	7,в

нения толщины зоны I, а за счет переноса зоны тепловыделения и формирования новой волны горения.

Рассмотрим переходный процесс, сопровождающийся распадом волны горения на два очага (см. рис. 3,в). Вскоре после распада очаг со стороны свежей смеси гаснет, а очаг, образовавшийся вниз по потоку, развивается и формирует стационарную волну. Это означает, что при изменении параметров газового потока область тепловыделения переносится со своего естественного положения на переднем фронте тепловой волны вниз по потоку в область заднего фронта тепловой волны в каркасе.

Можно предложить следующий механизм, объясняющий такой перенос. Расчеты с использованием программы СНЕМКИН [9] показывают, что с уменьшением содержания метана в смеси слабо меняется температура воспламенения, но значительно возрастает период индукции. Поэтому резкое уменьшение концентрации метана с 9 до 4 % может приводить к тому, что газ не воспламеняется на фронте пламени в точке x_1 . Невоспламенившийся газ течет через нагретую пористую среду и продолжает прогреться за счет межфазного теплообмена. Если газ прогревается до температуры воспламенения и время его пребывания становится больше периода индукции, соответствующего 4 %-й смеси, он воспламеняется. Координата, где будут достигнуты условия воспламенения, должна быть смещена вниз по потоку относительно прежнего положения зоны хи-

мических реакций, соответствующего горению 9 %-й смеси, и может оказаться на заднем фронте исходного профиля температуры в каркасе.

После того, как зона газового горения установится на новом месте, в этой области, благодаря интенсивному межфазному теплообмену, начинает быстро расти температура пористой среды, образуя новый температурный пик. При этом первый пик, оставшийся от исходного профиля температуры и уже не поддерживаемый тепловыделением, еще не успевает «рассосаться». Таким образом, формируется переходный двухпиковый профиль температуры, который оптически регистрируется как два очага яркого свечения. Со временем первый пик, не поддерживаемый тепловыделением химической реакции или с недостаточным тепловыделением, исчезает благодаря охлаждению за счет теплообмена с холодными газами. Второй пик развивается за счет тепла химических реакций, и со временем формируется обычный однопиковый профиль температуры пористой среды, соответствующий новым параметрам газового потока. Заметим, что после зажигания в новом месте волна газового горения может оказаться в «стрессовом» состоянии в условиях пониженной температуры каркаса, так как она должна формировать тепловую волну в каркасе за счет собственных повышенных теплопотерь. При этом очень существенным оказывается тепло, запасенное в первом очаге. Это тепло, поглощаемое свежим газом и переносимое в зону реакции, идет на поддержание горения в

период формирования новой структуры волны горения. Недостаток этого тепла, вероятно, может привести к гашению после воспламенения смеси на заднем фронте тепловой волны в каркасе.

Из предложенного объяснения можно прогнозировать, что при переходе к еще более бедным смесям или еще большим скоростям фильтрации должно произойти полное гашение, так как при этом газ, быстро «проскакивая» сквозь нагретую пористую среду, не успеет прогреться до необходимой температуры и набрать время пребывания, превышающее период индукции, до того, как будет снесен в холодную область. Тем не менее это не означает, что стационарная волна для таких параметров газового потока не может существовать, а означает только то, что она не может сформироваться из данного исходного состояния. Так, например, при переходе от 9 %-й смеси со скоростью фильтрации 39 см/с к 4 %-й смеси со скоростью фильтрации 105 см/с происходит затухание волны низких скоростей. А если сначала перейти к 4 %-й смеси со скоростью фильтрации 73 см/с и дать сформироваться стационарной волне, а затем уже перейти на скорость 105 см/с, то затухания не происходит и формируется стационарная волна горения.

Это обстоятельство может оказаться существенным, например, при зажигании волн фильтрационного горения газа, а также в горелочных устройствах типа реверс-процесса, в которых периодически меняется направление фильтрации газового потока и всякий раз происходит переформирование волны горения.

Перейдем к интерпретации переходных процессов при изменении параметров пористой среды. В экспериментах изучались переходы волн горения между двумя пористыми средами — засыпкой из карборунда со средним размером зерна ≈ 3 мм и засыпкой из керамических шаров диаметром 6,5 мм. Из табл. 1, где приведены характеристики использованных пористых сред (теплофизические свойства материалов взяты из [10]), следует, что теплоемкость единицы объема пористой среды $c_s \rho_s (1 - m)$ мало меняется при смене пористой среды, поэтому при прочих равных условиях обе пористые среды прогреваются и охлаждаются примерно с одинаковой скоростью. Коэффициент межфазного теплообмена α_i обратно пропорционален среднему размеру зерна и, следовательно, больше в мелкой пористой сре-

де. В этой же среде в два раза больше удельная поверхность. Поэтому межфазный теплообмен в мелкой пористой среде эффективнее, чем в крупной. Пористость засыпки из карборунда выше, чем засыпки из шаров. В результате этого на границе сред скорость фильтрации скачкообразно меняется примерно на 20 %.

Теплопроводность карборунда, как видно из табл. 1, на порядок больше, чем у керамики. Однако, согласно [11], теплопроводность пористой среды не определяется теплопроводностью материала каркаса и при наличии потока газа примерно выражается соотношением

$$\lambda_s \approx 10\lambda_g + 0,1\text{RePr}\lambda_g.$$

Здесь λ_s и λ_g — теплопроводность пористой среды и газа, Re и Pr — числа Рейнольдса и Прандтля. Так как Re пропорционально размеру зерна, то теплопроводность мелкой пористой среды меньше, чем крупной, несмотря на то, что материал мелкой пористой среды — карборунд — гораздо более теплопроводен.

Таким образом, переход волны горения из крупной в мелкую пористую среду должен сопровождаться уменьшением толщины зоны II за счет более эффективного теплообмена с горячими продуктами сгорания газа и соответственно увеличением максимальной температуры каркаса. При переходе зоны I в мелкую пористую среду уменьшение теплопроводности каркаса приводит к сужению этой зоны, а уменьшение скорости фильтрации — наоборот, к ее расширению, согласно (2). Поэтому изменение толщины зоны I должно быть весьма незначительным и едва ли будет замечено на фоне экспериментального разброса. Толщина зоны III, согласно (3), должна слабо уменьшаться при переходе в мелкую пористую среду за счет снижения скорости фильтрации. Изменение скорости фронта горения u также влияет на толщину этой зоны, однако в существенно меньшей степени, так как значение второго члена в числителе (3) не превышает в условиях наших экспериментов 30 % от первого.

При переходе волны горения из одной пористой среды в другую происходит не одновременная трансформация всей структуры волны, как это было в переходных процессах при изменении параметров газового потока, а последовательная, по мере распространения волны. Ввиду асимметрии профиля температуры существенным может оказаться, дви-

жется ли волна по потоку или против, а также то, каким фронтом волна входит в новую пористую среду — передним или задним. Рассмотрим конкретные сюжеты таких переходных процессов.

Все эффекты при переходах встречных и спутных волн из мелкой в крупную пористую среду, а также обратные переходы встречных волн могут быть сведены к увеличению или уменьшению толщины тепловой волны в каркасе, причем в мелкой пористой среде толщина волны меньше (см. рис. 4, 5). Изменение толщины тепловой волны, очевидно, обусловлено изменением интенсивности межфазного теплообмена в зоне II и уменьшением толщины зоны III за счет снижения скорости фильтрации. Это обстоятельство объясняет тот факт, что изменение толщины тепловой волны при переходе границы сред происходит за счет изменения скорости движения заднего фронта (см. рис. 4, 5).

Табл. 2 позволяет сопоставить скорости распространения волны горения, измеренные (где это возможно) в переходных процессах после выхода на стационарную траекторию, и скорости стационарных волн горения для обеих сред, измеренные в независимых экспериментах. Видно, что после перехода границы волна горения, как правило, достигает значения стационарной скорости, соответствующей пористой среде, в которую волна перешла.

Наибольшее разнообразие переходных эффектов наблюдается при переходе спутной волны горения из крупной в мелкую пористую среду. Рассмотрим происходящие при этом трансформации структуры волны. Так как толщина зоны III, согласно (3) и табл. 1, слабо меняется при смене пористой среды, вход зоны III в мелкую пористую среду, как правило, не сопровождается заметным изменением скорости распространения фронтов (см. рис. 6, 7). Когда правый край зоны II входит в мелкую пористую среду (см. рис. 1), то за счет интенсификации межфазного теплообмена, во-первых, незначительно увеличивается подвод тепла от газа и, во-вторых, усиливается прогрев каркаса в зоне II. Дальнейшее развитие переходного процесса зависит от параметров газового потока: калорийности смеси и скорости фильтрации. При достаточно калорийной 6 %-й смеси небольшое увеличение теплотеря от газа не сказывается драматически на скорости горения газа. С другой стороны, прогрессиру-

ющее увеличение температуры каркаса в зоне II по мере перехода волны горения в мелкую пористую среду способствует увеличению кондуктивного потока тепла из зоны II в зону I. В результате конвективное охлаждение каркаса в зоне I замедляется, и скорость распространения переднего фронта падает, как на рис. 6,а. Наблюдается торможение волны горения на границе. Роль этого эффекта должна возрастать с уменьшением скорости фильтрации, так как на фоне меньшей исходной температуры каркаса, соответствующей меньшей скорости фильтрации, относительное ее увеличение в зоне II при переходе в мелкую пористую среду более существенно. Поэтому на рис. 6,б задержка волны горения на границе составила уже ≈ 1 ч, а на рис. 6,в — более 1,5 ч.

Обнаруженная тенденция увеличения времени задержки при уменьшении скорости фильтрации позволяет предполагать возможность окончательной стабилизации волны горения на границе сред за счет формирования такой структуры волны, когда кондуктивный прогрев каркаса на переднем фронте полностью уравнивает его конвективное охлаждение.

При меньшей калорийности смеси переход спутной волны из крупной в мелкую пористую среду происходит по другому сценарию. Так как в этом случае горит околопредельная смесь, то даже незначительного увеличения теплотеря из газа при переходе зоны II в мелкую пористую среду (см. рис. 1) может быть достаточно для прекращения горения. Такой случай показан на рис. 7,а. При этом в отсутствие границы сред такой смеси с такой же скоростью фильтрации в мелкой пористой среде соответствует стационарная спутная волна горения со скоростью $1,16 \cdot 10^{-2}$ см/с (см. табл. 2).

При большей скорости фильтрации увеличение теплотеря из газа также приводит к гашению, когда правый край зоны II переходит в мелкую пористую среду (см. рис. 7,б). Однако в этом случае, благодаря большей скорости фильтрации, температура пористой среды и толщина прогретого слоя в пористой среде больше, чем в предыдущем примере. Поэтому погасшая газовая смесь не выбрасывается в холодную пористую среду, как в предыдущем случае, а продолжает прогреваться, проходя по прогретой пористой среде, и снова загорается уже в мелкой пористой среде, как это было описано при интерпретации переходных процессов

при изменении калорийности смеси. Вход газового потока в мелкую пористую среду способствует более быстрому прогреву и зажиганию смеси за счет интенсификации межфазного теплообмена в мелкой пористой среде. В результате образуется переходная структура, наблюдаемая в виде двух ярких очагов, разделенных областью более низких температур.

При еще большей скорости фильтрации переходный процесс развивается по аналогичному сценарию (см. рис. 7, в). Однако в этом случае разделение волны горения на два очага выражено не столь явно. Кроме того, если в предыдущем примере разделение на очаги произошло, когда задний фронт волны только начал переходить в мелкую пористую среду, то при большей скорости фильтрации это происходит, когда волна уже почти целиком находится в мелкой пористой среде. Эти особенности обусловлены тем, что увеличение скорости фильтрации приводит к еще большему росту температуры каркаса. 4 %-я смесь в этих условиях горит более устойчиво. Поэтому для гашения необходимо более значительное увеличение теплопотерь из газа, которое реализуется, когда основная часть зоны II переходит в мелкую пористую среду. При этом, опять же благодаря более высокой температуре каркаса, повторное зажигание происходит вблизи прежнего положения области газового горения. Поэтому два очага практически слились, и на их существование указывает только скачок координаты переднего фронта волны при переходе через границу.

Отметим, что переход через границу сред, сопровождаемый распадом волны на два очага, нельзя назвать явлением уникальным, характерным только для 4 %-й смеси. Такой тип перехода наблюдался и при 5 %-й и даже 6 %-й смеси вблизи предела по скорости фильтрации.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало, что неправомерно прогнозировать переходное поведение, основываясь только на характеристиках стационарных волн для начальных и конечных параметров системы. В процессе перехода может сформироваться устойчивая структура волны горения, не соответствующая ни начальным, ни конечным условиям. Примером такого переходного процесса является стабилизация волны горения на границе сред.

С другой стороны, в процессе трансформации волны в переходном процессе может возникнуть такая промежуточная тепловая структура, при которой теплопотери из газа превысят критический уровень и произойдет гашение, несмотря на то, что в стационарных условиях при конечных значениях параметров волны горения существует. Примеры такого рода также получены в работе.

Обнаружен тип переходного процесса, сопровождающийся переносом зоны газового горения с переднего на задний фронт исходного профиля температуры. Этот эффект может вносить непрогнозируемые возмущения в работу нестационарных горелочных устройств, в которых используется принцип фильтрационного горения газа, таких как реверс-процесс с гомогенным типом химической реакции.

Авторы выражают благодарность проф. В. С. Бабкину за полезное обсуждение материалов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лаевский Ю. М., Бабкин В. С.** Фильтрационное горение газа // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Под ред. Ю. Ш. Матроса. Новосибирск: Наука, 1988.
2. **Takeno T., Sato K.** A theoretical and experimental study of an excess enthalpy flame // *Combustion in Reactive Systems. Progress in Astronautics and Aeronautics*; V. 76. 1981.
3. **Какуткина Н. А., Боровых И. В., Бабкин В. С.** Способ сжигания газовых и паровых смесей: Пат. 2100695, 1997.
4. **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.
5. **Какуткина Н. А., Бабкин В. С.** Закономерности распространения сферических волн фильтрационного горения газа в инертных пористых средах // *Физика горения и взрыва*. 1999. Т. 35, № 1. С. 60–66.
6. **Какуткина Н. А., Бабкин В. С.** Характеристики стационарных сферических волн горения газа в инертных пористых средах // *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 34, № 2. С. 9–19.
7. **Futko S. I., Dobrego K. V., Zhdanok S. A.** Flame localization inside axis-symmetric cylindrical and spherical porous media burners // *Heat and Mass Transfer*. 1998. V. 41, N 22. P. 3647–3655.
8. **Потытняков С. И., Бабкин В. С., Лаевский Ю. М., Дробышев В. И.** Исследование тепловой структуры волны фильтрационного горения газов // *Физика горения и взрыва*. 1985. Т. 21, № 2. С. 19–25.

9. **Kee R. J., Rupley F. M., Miller J. A.** CHEMKIN-II. Sandia Report SAND89-8009BUC-706. Sandia National Laboratories, Livermore, CA, 1989.
10. **Краткий** справочник металлурга / Под ред. В. П. Адрианова М.: Металлургиздат, 1960.
11. **Аэров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А.** Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л.: Химия, 1979.

Поступила в редакцию 21/VI 2003 г.
