

## ПЕРЕСТРОЙКА СТРУКТУРЫ ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПРИ СМЕНЕ СОСТАВА ТОПЛИВА

С. В. Глазов, Е. А. Салганский, В. М. Кислов, М. В. Салганская,  
А. Ф. Жолудев

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, glazov@icp.ac.ru

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование переходных процессов при резком изменении количества горючего в смеси углерод/инертный материал в волне фильтрационного горения со сверхадиабатическим разогревом. Установлено, что переход от бедной смеси к богатой, когда «нормальная» тепловая структура волны перестраивается в «инверсную», характеризуется значительным локальным разогревом, в то время как при обратной смене состава повышения температуры не наблюдается.

Ключевые слова: фильтрационное горение, сверхадиабатические разогревы, переходные режимы.

### ВВЕДЕНИЕ

При фильтрационном горении твердого топлива в спутном режиме (когда направление фильтрации газообразного окислителя совпадает с направлением движения фронта) наблюдается распространение сверхадиабатических волн горения [1, 2]. Хорошо известно, что в такой системе может реализоваться тепловой резонанс, характеризующийся высокой температурой во фронте горения. Режимы, близкие к резонансному, имеют различную тепловую структуру волны. «Нормальная» структура волны горения характеризуется крутым передним фронтом и широкой зоной горячих твердых продуктов за фронтом, а «инверсная», наоборот, широкой областью прогрева исходного вещества перед фронтом горения и резким спадом температуры за фронтом. Тип структуры определяется соотношением теплоемкостей встречных потоков газа и твердого вещества и может изменяться при варьировании содержания горючего в твердом материале или содержания окислителя в поступающем газе.

Если при продвижении волны горения происходит значительное изменение состава твердого топлива или газообразного окислителя, то это означает, что должны существовать переходные процессы перестройки волны. Переходные процессы при изменении характеристик

твердого пористого носителя и состава газа были изучены для случая фильтрационного горения газов [3], когда твердый пористый каркас не являлся горючим, а лишь выступал в роли теплоносителя и стабилизатора горения. При этом было показано, что нельзя прогнозировать переходные процессы, основываясь лишь на характеристиках стационарных волн горения. Возможны различные нетривиальные режимы переходных процессов с переносом зоны горения, затуханием волны и другими эффектами.

В случае фильтрационного горения твердого топлива особенно сложные переходные процессы можно ожидать при смене типа структуры волны — с нормальной на инверсную или наоборот. Такие процессы могут приводить к значительному локальному повышению температуры во фронте горения. Это превышение обусловлено дополнительным подогревом твердой или газовой фазы в момент перестройки структуры по сравнению с обычным режимом.

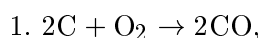
### ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Численное исследование переходных процессов при смене состава топлива проводили с использованием одномерной двухтемпературной математической модели фильтрационного горения твердого топлива, подробно описанной в [4]. Модель учитывает зависимость теплофизических характеристик твердой и газовой фаз от температуры и состава, слож-

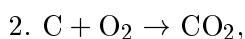
Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-03-00623а) и программы № 19 фундаментальных исследований Президиума РАН «Химические аспекты энергетики».

ную схему химических реакций, конечный размер реактора. При построении модели полагали, что боковые теплотери малы по сравнению с общим тепловыделением химических реакций, массовый расход окислителя остается постоянным, а перепад давления мал, т. е. течение газа безнапорное. Система уравнений включает уравнения сохранения энергии для газовой и для твердой фаз, уравнения неразрывности по каждому компоненту, уравнение состояния газа, уравнения тепловыделения химических реакций, уравнение межфазного теплообмена и замыкается соответствующими начальными и граничными условиями. Систему уравнений решали методом Ньютона. Аппроксимацию уравнений проводили на неравномерной сетке. Полученную систему нелинейных алгебраических уравнений на каждом временном слое решали методом итераций.

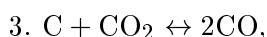
Химическая схема включала четыре реакции (одна из которых обратимая) со следующими константами скорости:



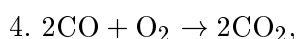
$$k = 2.5 \cdot 10^6 \cdot \exp(-131\,000/RT), \text{ с}^{-1} [5];$$



$$k = 1.6 \cdot 10^4 \cdot \exp(-98\,000/RT), \text{ с}^{-1} [5];$$



$$k = 4.6 \cdot 10^2 \cdot \exp(-140\,000/RT), \text{ с}^{-1} [6];$$



$$k = 3 \cdot 10^7 \cdot \exp(-118\,832/RT), \text{ моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}) [7].$$

Остальные реакции исключены из схемы, поскольку водородосодержащие компоненты в системе отсутствуют.

Так как модель не учитывает боковые теплотери, расчет процесса фильтрационного горения в смеси углерод/инертный материал при использовании воздуха в качестве окислителя дает завышенные значения максимальной температуры горения, превышающие температуру плавления многих твердых веществ. Чтобы не попадать в область высоких температур горения, расчет проводили для случая, когда в качестве газифицирующего агента используется воздух, разбавленный азотом. То есть объемный состав газовой фазы на входе в реактор задавали следующим: 10 % O<sub>2</sub> и

90 % N<sub>2</sub>. Теплофизические характеристики газовой фазы соответствовали характеристикам разбавленного азотом воздуха, характеристики углерода (горючего) — характеристикам угля БАУ-А, характеристики инертного материала — корунду. Для исследования переходных процессов выбраны два характерных состава исходной смеси. Смесь, содержащая (по массе) 4 % углерода (бедный состав), соответствовала нормальной структуре волны горения, а смесь, содержащая 80 % углерода (богатый состав), — инверсной структуре. Полагали, что первоначально половина реактора заполнена смесью одного состава, а оставшаяся часть — смесью другого состава. Иницирование процесса осуществлялось заданием ступенчатой функции температуры твердой фазы. Длину реактора выбирали такой, чтобы волна горения успела выйти на установившийся режим до того, как достигнет границы раздела состава твердой фазы.

На рис. 1 представлены профили температуры твердой фазы в последовательные моменты времени при переходе от нормальной структуры волны горения к инверсной. Штриховой линией ( $z = 0.5$  м) обозначена граница смены составов твердой фазы с разным содержанием углерода. Штрихпунктирная линия на всех рисунках показывает изменение максимальной температуры твердой фазы во времени.

После иницирования процесса формировалась волна горения с крутым передним фрон-

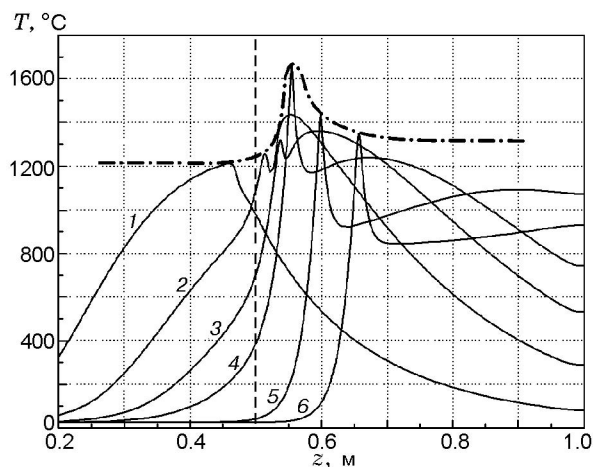


Рис. 1. Расчетные профили температуры твердой фазы в процессе перестройки структуры волны с нормальной на инверсную:

моменты времени от начала эксперимента, мин: 1 — 8, 2 — 12, 3 — 15, 4 — 17.5, 5 — 25, 6 — 35

том, максимальная температура горения составляла  $1205\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Когда зона горения достигала границы смены состава, за фронтом горения оставались горячие твердые продукты. После этого начинала формироваться инверсная структура волны: скорость фронта горения уменьшалась и тепло из зоны горения выносилось газообразными продуктами реакции. Однако, в отличие от стационарной инверсной волны горения, в которой газообразный окислитель поступает в зону химических реакций с начальной температурой, в данном случае газообразный окислитель подавался в зону горения предварительно подогретым. Вследствие этого температура горения увеличивалась, и наблюдался локальный перегрев с максимальной температурой  $1655\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Далее температура горения начинала падать, так как расходовалось тепло, запасенное твердыми продуктами в области бедного состава. Когда температура окислителя, поступающего в зону горения, снижалась до начальной, устанавливалась инверсная структура волны горения с максимальной температурой  $1330\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, локальный подъем температуры при смене состава твердой фазы с бедного на богатый составлял более  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 2 представлена зависимость состава газообразных продуктов от времени при переходе от нормальной структуры волны горения к инверсной. Момент смены состава твердой фазы соответствует  $t = 8.5$  мин, т. е. в это время максимальная температура твердой

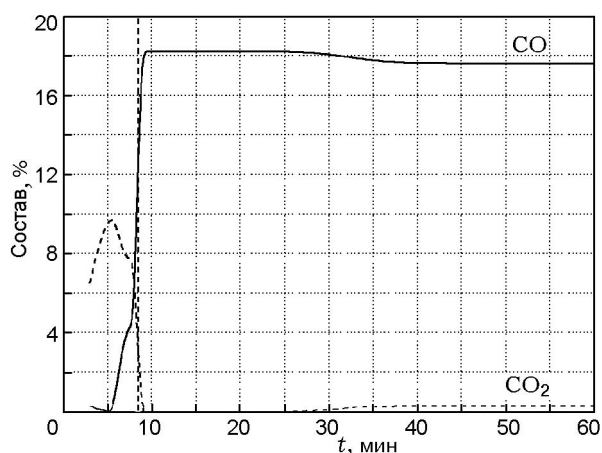


Рис. 2. Изменение объемного состава продукта-газа в процессе перестройки структуры волны фильтрационного горения с нормальной на инверсную

фазы локализовалась при  $z = 0.5$  м. Из рисунка видно, что в случае нормальной структуры волны горения доминирующим продуктом окисления был  $\text{CO}_2$ , что характерно для горения бедных составов. После прохождения фронтом горения границы смены состава твердой фазы преобладающим становился  $\text{CO}$ , и далее после установления инверсной структуры волны горения  $\text{CO}$  оставался основным продуктом окисления углерода, что характерно для горения богатых составов. Таким образом, при переходе от нормальной структуры волны горения к инверсной состав газообразных продуктов изменялся от характерного для нормальных волн до характерного для инверсных.

Изменение тепловой структуры волны горения с инверсной на нормальную представлено на рис. 3. При  $0 \leq z \leq 0.5$  м реактор заполнен смесью, содержащей 80 % углерода, при  $0.5 < z \leq 1$  м — смесью с 4 % углерода. При прохождении волны горения по первой половине реактора формировалась инверсная структура волны с максимальной температурой в зоне горения  $1330\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В момент времени, когда фронт горения достигал границы смены состава твердой фазы, бедная смесь, содержащая 4 % углерода, прогревалась газообразными продуктами реакции. Далее скорость фронта горения резко увеличивалась вследствие малого содержания углерода в смеси. Формировалась нормальная структура волны горения, которая распространялась по предварительно

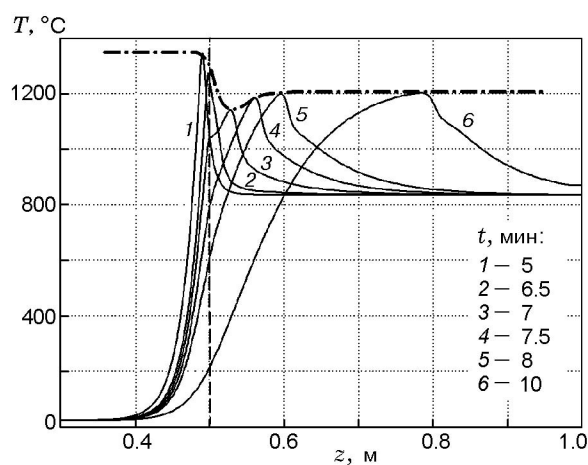


Рис. 3. Расчетные профили температуры твердой фазы в процессе перестройки структуры волны с инверсной на нормальную:

$t$  — моменты времени, отсчитываемые от начала эксперимента

подогретой смеси, в отличие от стационарной волны горения с крутым передним фронтом охлаждения. Температура горения снижалась и устанавливалась на уровне  $1205\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При переходе от инверсной структуры волны горения к нормальной локального подъема температуры горения не наблюдалось и, что интересно, даже предварительный подогрев исходной смеси не приводил к увеличению температуры в волне горения.

Объяснить это явление можно, проанализировав рис. 4. На рисунке представлена зависимость состава газообразных продуктов от времени при смене структуры волны горения с инверсной на нормальную. Момент времени 8.5 мин соответствует смене состава твердой фазы, когда максимальное значение температуры твердой фазы находилось в середине реактора. До начала переходного процесса основным продуктом окисления углерода являлся СО ( $\approx 18\%$ ), а  $\text{CO}_2$  практически отсутствовал, что характерно для горения смеси богатого состава. После того как фронт горения достигал границы смены состава твердой фазы, наблюдалось временное снижение содержания монооксида и увеличение содержания диоксида углерода. Далее, когда начинала формироваться нормальная структура волны горения, основным продуктом окисления углерода вновь становился монооксид ( $\approx 14\%$ ), в то время как содержание диоксида составляло менее  $3\%$ , что нехарактерно для горения смеси бедного состава. Как известно, тепловой эффект

реакции окисления углерода до СО почти в 2.5 раза ниже теплового эффекта окисления углерода до  $\text{CO}_2$ . Отсутствие подъема температуры горения при смене структуры волны с инверсной на нормальную связано со значительным снижением общего тепловыделения химических реакций в формирующейся нормальной волне.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальную проверку наличия локального повышения температуры при смене структуры волны проводили с использованием лабораторного кварцевого реактора диаметром 46 мм, подробно описанного в работе [4]. В большинстве опытов в качестве горючего брали уголь марки БАУ-А, но в некоторых экспериментах — древесный березовый уголь (ГОСТ 7657-84). В качестве твердого инертного материала использовали крошку шамотного кирпича марки ШЛ-1,3. Роль «бедной» смеси горючего с инертным материалом выполнял состав с содержанием углерода  $10\%$ , а «богатой» смеси — с содержанием углерода  $80\%$ . Реактор наполовину загружали смесью одного состава, наполовину — смесью второго состава. Размер частиц твердого материала находился в пределах  $1 \div 5$  мм. Окислителем служил воздух, скорость подачи воздуха (на сечение реактора) в каждом опыте была фиксированной и составляла либо  $0.1$ , либо  $0.2$  м/с. В некоторых экспериментах для снижения боковых теплотерь вокруг реактора на расстоянии  $3 \div 5$  мм от его стенок устанавливали отражающий экран из алюминиевой фольги. Температуру в зоне горения регистрировали пирометром и термометрами, спай которых располагались возле стенки реактора. Пирометр, в отличие от термометра, фиксировал максимальную температуру более глубокого слоя (не возле самой стенки, а на расстоянии  $5 \div 7$  мм по направлению к оси реактора, где температура была несколько выше). Кроме того, проводили периодический отбор газообразных продуктов. В большинстве экспериментов, чтобы избежать неравномерности проседания смеси вследствие выгорания угля, осуществляли принудительную просадку, которая способствовала более равномерному движению материала в реакторе.

По вышеописанной схеме был выполнен ряд экспериментов, результаты которых представлены в таблице. В столбцах, помеченных

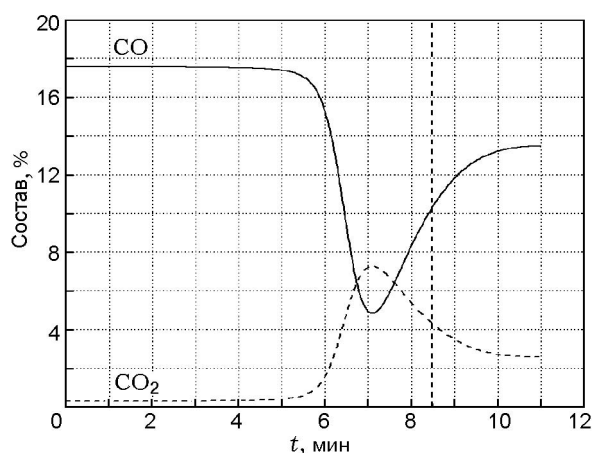


Рис. 4. Изменение объемного состава продукта-газа в процессе перестройки структуры волны фильтрационного горения с инверсной на нормальную

Максимальная температура и состав продуктов в экспериментах по фильтрационному горению при изменении состава топлива

Тип перехода	Условия экспериментов	$T_{\max}$ , °C			CO <sub>2</sub> , %			CO, %		
		до	переход	после	до	переход	после	до	переход	после
Норм.→инв.	Теплоизоляция, просадка, уголь БАУ, $G = 0.2$ м/с	1100	1400	1400	9	7	2	15	18	29
Инв.→норм.	Теплоизоляция, просадка, уголь БАУ, $G = 0.2$ м/с	1100	1200	1200	2	2	5	29	28	23
Норм.→инв.	Без теплоизоляции, уголь БАУ, $G = 0.2$ м/с	890 1030*	1120 1250*	850 1100*	10.0	4.1	3.5	11.1	26.3	22.0
Норм.→инв.	Без теплоизоляции, просадка, уголь БАУ, $G = 0.2$ м/с	770 840*	1020 1330*	890 1070*	11.4	4.6	2.5	10.9	23.5	26.6
Норм.→инв.	Без теплоизоляции, просадка, древесный уголь, $G = 0.1$ м/с	760 910*	960 980*	750 930*	14.2	12.4	6.0	4.5	10.2	22.0
Инв.→норм.	Без теплоизоляции, просадка, древесный уголь, $G = 0.1$ м/с	830 1000*	610 1030*	720 920	6.7	6.3	14.6	19.7	21.7	4.5

\*Измерения температуры выполнены пирометром.

«до», даны значения характеристик волны горения за 2 ÷ 3 мин до начала переходного процесса; помеченных «переход» — значения характеристик во время переходного процесса; помеченных «после» — значения характеристик через 2 ÷ 3 мин после переходного процесса. Отметим, что уровень боковых теплопотерь в такой маленькой установке достаточно высок. Как показали результаты экспериментов, увеличение теплопотерь приводит к снижению перегрева в волне горения и к сокращению времени переходного процесса.

На рис. 5 представлено изменение профилей температуры, характерное для перестройки структуры волны горения с нормальной на инверсную. Как видно из рисунка, в момент перехода волны горения из бедного состава в богатый максимальная температура в волне была на 200 °C выше, чем в установившейся волне горения до момента перехода, и выше, чем спустя несколько минут после пересечения границы смены состава. Такое возрастание температуры существенно превышало разброс экспериментальных данных, который составлял приблизительно  $\pm 50$  °C. Видно, что повышение температуры носит временный характер и через несколько минут температура устанавли-

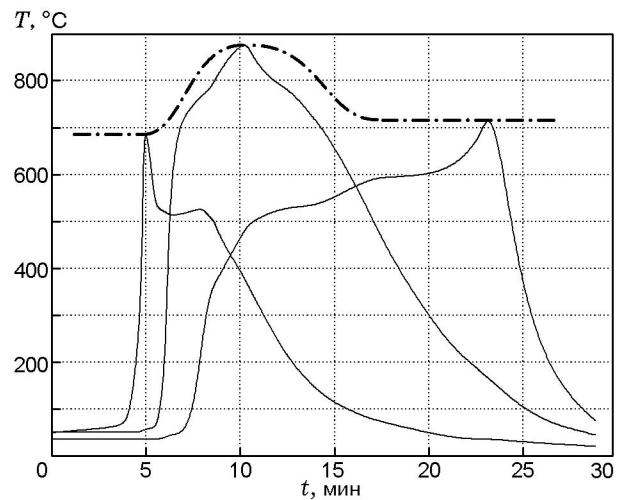


Рис. 5. Изменение профилей температуры при перестройке структуры волны горения с нормальной на инверсную

ливалась на уровне, характерном для инверсной структуры волны горения.

Изменение состава газообразных продуктов, соответствующее этому эксперименту, представлено на рис. 6. В начальный момент времени преобладает CO<sub>2</sub> ( $\approx 15$  %), что ха-

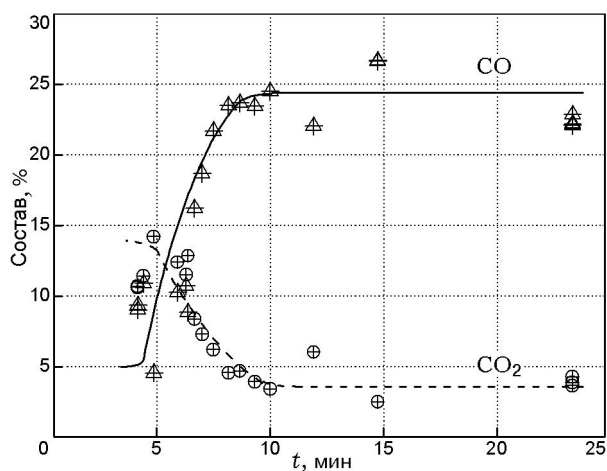


Рис. 6. Изменение объемного состава продукта-газа при перестройке структуры волны горения с нормальной на инверсную

рактрно для горения смеси бедного состава. При перестройке структуры волны содержание  $\text{CO}_2$  снижалось, а  $\text{CO}$  возрастало. Далее основным продуктом газификации оставался  $\text{CO}$  ( $\approx 25\%$ ), что характерно для горения смеси богатого состава.

При переходе от инверсной структуры волны горения к нормальной некоторое повышение температуры в момент перехода лишь немного превысило разброс экспериментальных данных, а в некоторых экспериментах температура даже немного снизилась (см. таблицу).

Характерное изменение профилей температуры при переходе волны из богатого состава в бедный представлено на рис. 7. Изменение состава газообразных продуктов (рис. 8) полностью согласуется с изменением максимальной температуры в реакторе. В момент перехода (35 мин от начала эксперимента), когда наблюдалось снижение температуры, преобладал  $\text{CO}_2$ , однако далее содержание  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  установилось на значениях  $\approx 10\%$ . Повышенное содержание  $\text{CO}$ , нехарактерное для установившейся волны горения бедного состава, сохранялось в течение нескольких минут.

Таким образом, при переходе структуры волны горения с инверсной на нормальную существенного подъема максимальной температуры горения не зафиксировано. Это связано с тем, что в нормальной волне, формирующейся во время перестройки структуры, в отличие от стационарной нормальной волны горения, до-

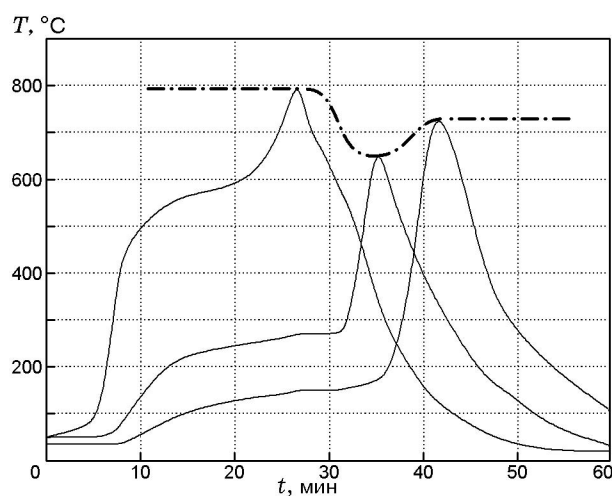


Рис. 7. Изменение профилей температуры при перестройке структуры волны горения с инверсной на нормальную

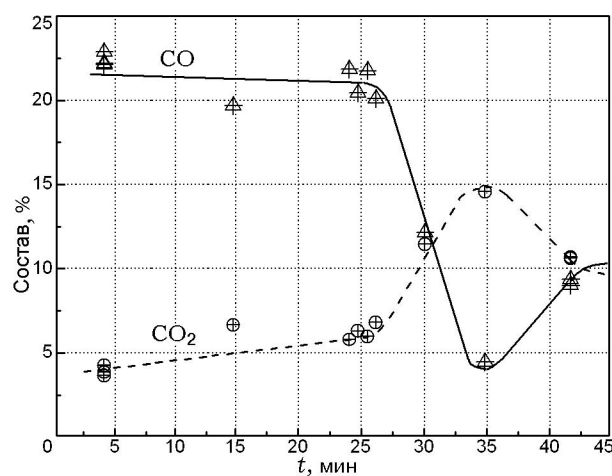


Рис. 8. Изменение объемного состава продукта-газа при перестройке структуры волны горения с инверсной на нормальную

вольно долго существует протяженная область прогретого исходного топлива, где протекают реакции восстановления диоксида до монооксида углерода. Вследствие этого преобладающим продуктом окисления являлся монооксид, и общее тепловыделение было существенно ниже. Скорость распространения волны изменялась в соответствии с ожидаемым, поскольку во всех экспериментах углерод сгорал полностью.

Результаты экспериментов с хорошей точностью подтвердили выводы численных расчетов о поведении характеристик фильтрацион-

ного горения твердых топлив при смене тепловой структуры волны.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как в расчетах, так и в экспериментах обнаружено, что переход от нормальной структуры волны горения к инверсной характеризуется значительным увеличением температуры в зоне горения. При обратном переходе, от инверсной структуры к нормальной, существенного увеличения температуры не наблюдается вследствие снижения общего тепловыделения в зоне горения, вызванного сменой основного продукта окисления.

Авторы выражают признательность Е. В. Полианчику за ценные замечания при обсуждении работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Распространение** тепловых волн в гетерогенных средах / под ред. Ю. Ш. Матроса. — Новосибирск: Наука, 1988.
2. **Салганский Е. А., Полианчик Е. В., Манелис Г. Б.** Моделирование горения углерода в фильтрационном режиме // Хим. физика. — 2006. — Т. 25, № 10. — С. 83–91.
3. **Какуткина Н. А., Мбарова М.** Переходные процессы при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 5. — С. 62–73.
4. **Салганский Е. А., Кислов В. М., Глазов С. В., Жолудев А. Ф., Манелис Г. Б.** Фильтрационное горение системы углерод — инертный материал в режиме со сверхдиабатическим разогревом // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 3. — С. 30–38.
5. **Li C., Brown T. C.** Carbon oxidation kinetics from evolved carbon oxide analysis during temperature — programmed oxidation // Carbon. — 2001. — V. 39. — P. 725–732.
6. **Волкова Н. Н., Жирнов А. А., Салганский Е. А., Манелис Г. Б.** Кинетические закономерности окисления углерода воздухом, водяным паром и  $\text{CO}_2$  // XIII Симпоз. по горению и взрыву. — Черногоровка, 2005. — С. 193.
7. **Лавров Н. В., Розенфельд Е. И., Хаустович Г. Н.** Процессы горения топлива и защиты окружающей среды. — М.: Металлургия, 1981.

*Поступила в редакцию 12/V 2009 г.*

---