

УДК 534.2, 546.2

ДЕТОНАЦИОННОЕ СЖИГАНИЕ КАМЕННОГО УГЛЯ

Ф. А. Быковский¹, С. А. Ждан¹, Е. Ф. Ведерников¹, Ю. А. Жолобов²¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, bykovskii@hydro.nsc.ru²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Приведены результаты экспериментального исследования непрерывной спиновой детонации угольно-воздушной смеси с добавкой водорода в вихревой плоскорадиальной камере диаметром 500 мм. Использовался измельченный кузбасский длиннопламенный каменный уголь размером $1 \div 7$ мкм, содержащий 24.7 % летучих, 14.2 % золы и 5.1 % влажности. Впервые реализованы устойчивые режимы непрерывной спиновой детонации с поперечными детонационными волнами со скоростью $1.86 \div 1.1$ км/с относительно цилиндрической стенки камеры. Массовая доля водорода по отношению к воздуху составляла $1.5 \div 0.88$ %, по отношению к углю — $50 \div 3.4$ %, достигнут максимальный удельный расход угля 106 кг/(с · м²).

Ключевые слова: каменный уголь, угольно-воздушная смесь, непрерывная спиновая детонация, плоскорадиальная вихревая камера, структура течения.

В работах [1–5] приведены результаты экспериментального исследования непрерывного детонационного сжигания активированного древесного угля с добавкой водорода в вихревых камерах плоскорадиальной геометрии при удельном расходе угля $g_C = 10 \div 30$ кг/(с · м²). Цель настоящей работы — реализовать и исследовать непрерывное детонационное сжигание частиц каменного угля в камере плоскорадиальной геометрии диаметром $d_{c1} = 500$ мм. Использовался кузбасский длиннопламенный уголь мелкого помола с добавкой водорода, а в качестве окислителя — воздух.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ КАМЕРА И СИСТЕМА ПОДАЧИ СМЕСЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ

Экспериментальная плоскорадиальная камера диаметром $d_{c1} = 500$ мм с истечением к центру аналогична описанной в [5]. Выхлоп продуктов реакции происходил в отверстие диаметром $d_{c2} = 250, 175$ или 125 мм в одной из плоских стенок. Для более равномерного распределения взвеси частиц угля его подвод к коллектору осуществлялся через 24 труб-

ки. Ход поршня, выталкивающего уголь, дискретно фиксировали магнитно-управляемыми датчиками (герконами), расположенными на наружной поверхности цилиндра и замыкающими электрическую цепь при прохождении кольцевого магнита, находящегося на поршне. Для гарантированного поджата поверхности поршня к засыпке угля устанавливали дополнительную пневмосистему. В ряде опытов использовали перфорированный по всей поверхности свободный поршень с большим зазором (0.5 мм) («пористый поршень» [6]). Насыщение угля водородом производили через калиброванную диафрагму диаметром $d_e = 5, 4$ или 3 мм и частично через зазор между поршнем и цилиндром.

Используемые форсунки воздуха различались количеством отверстий и размерами в поперечном сечении: А1 — $250 \times 1.5 \times 2.8$ мм, А2 — $250 \times 1 \times 2$ мм, отверстия направлены под углом 60° к радиусу. Форсунки угля имели отверстия размером: F1 — $150 \times 1 \times 1.2$ мм, F2 — $75 \times 1 \times 1.2$ мм, F3 — $150 \times 0.5 \times 1$ мм, направленные вдоль радиуса. За время подачи угля в камеру ($t \approx 0.25 \div 0.4$ с) его расход составлял $G_C = 0.3 \div 3.57$ кг/с, расход воздуха — $G_a = 13 \rightarrow 4.3$ кг/с. Коэффициент избытка горючего (угля) изменялся в пределах $\phi_C = 0.25 \div 3.5$. Расходы водорода в разных опытах и в течение одного опыта находились в диапазоне $G_H = 170 \div 50$ г/с. Работа установки, иницирование детонации в смеси, фоторегистрация процесса, регистрация давления в

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках программ отделений РАН (проект № 2.1.4), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-08-00225) и гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ 5770.2010.1).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А., 2012.

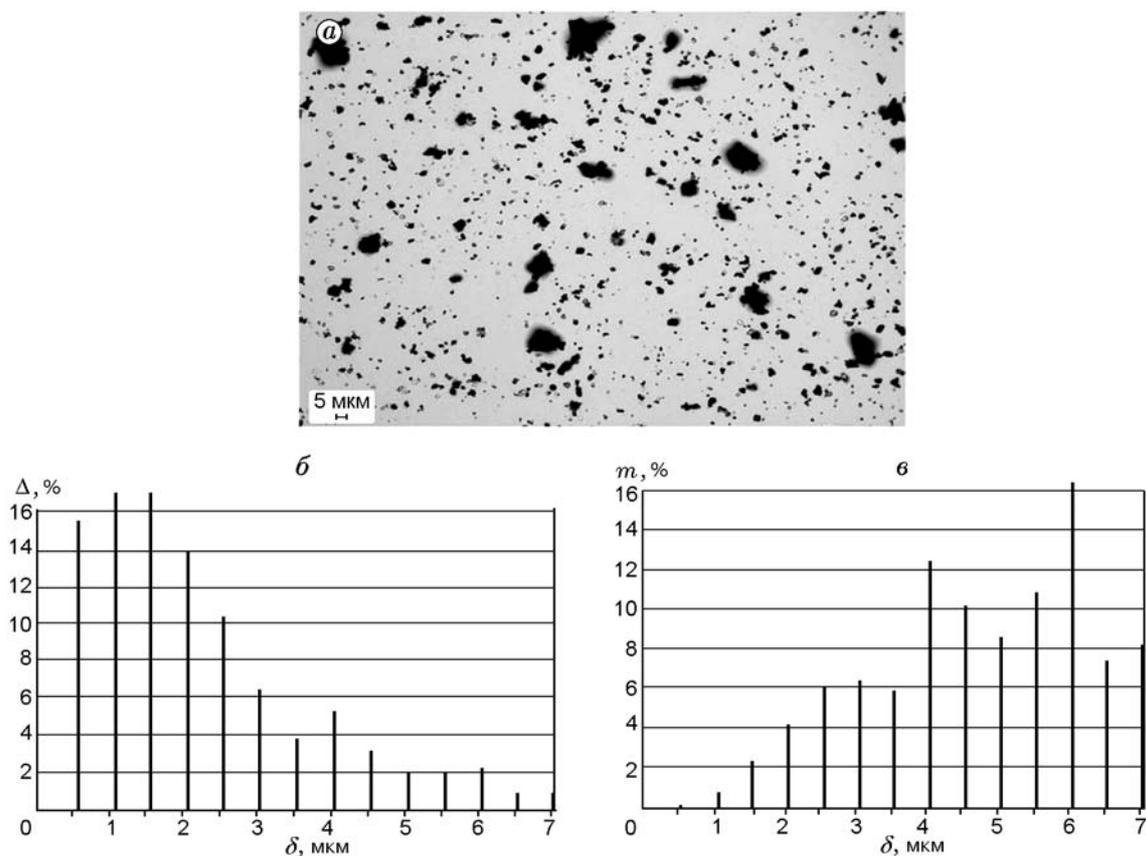


Рис. 1. Фотография помола каменного угля, полученная через электронный микроскоп (а), и его распределение по размерам (б) и массе (в)

камере и системе подачи описаны в работе [5].

Фотография частиц угля, полученная с помощью электронного микроскопа, приведена на рис. 1, а, а его состав по размеру частиц δ и массе m — соответственно на рис. 1, б и 1, в.

Размер частиц определяли по специальной компьютерной программе. Размер самых крупных частиц — $\delta \approx 7$ мкм, между ними находилось много микронных частиц и их конгломератов. При построении распределения частиц по массе считалось, что масса частицы пропорциональна кубу ее характерного размера. При отсутствии сертификата для конкретной массы угля (50 кг) проводили структурный анализ помола. Аналитическую пробу помола готовили согласно ГОСТ 9080 и расходовали ее на определение по стандартным методикам насыпной плотности ρ_C [7], влажности W^{ru} (ГОСТ 6963), зольности A^d (ГОСТ 6383) и выхода летучих веществ V^{daf} (ГОСТ 6382). Данные анализа приведены в табл. 1, из которой следует, что горючим является около 80 %

Таблица 1
Состав каменного угля

ρ_{C0} , г/см ³	ρ_C , г/см ³	δ , мкм	W^{ru} , %	A^d , %	V^{daf} , %
1.26	0.53	1 ÷ 7	5.065	14.18	24.68

Примечание. ρ_{C0} — плотность массива каменного угля.

исходного угля ($G_C^1 = 0.8G_C$), в том числе чистого углерода — всего 55 % (чуть больше половины состава угля).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Впервые реализована непрерывная спиновая детонация взвеси частиц каменного угля с воздухом при добавлении в уголь водорода. На рис. 2 представлены фрагменты фоторегистрограмм типичного непрерывного спинового детонационного режима горения угля. Парамет-

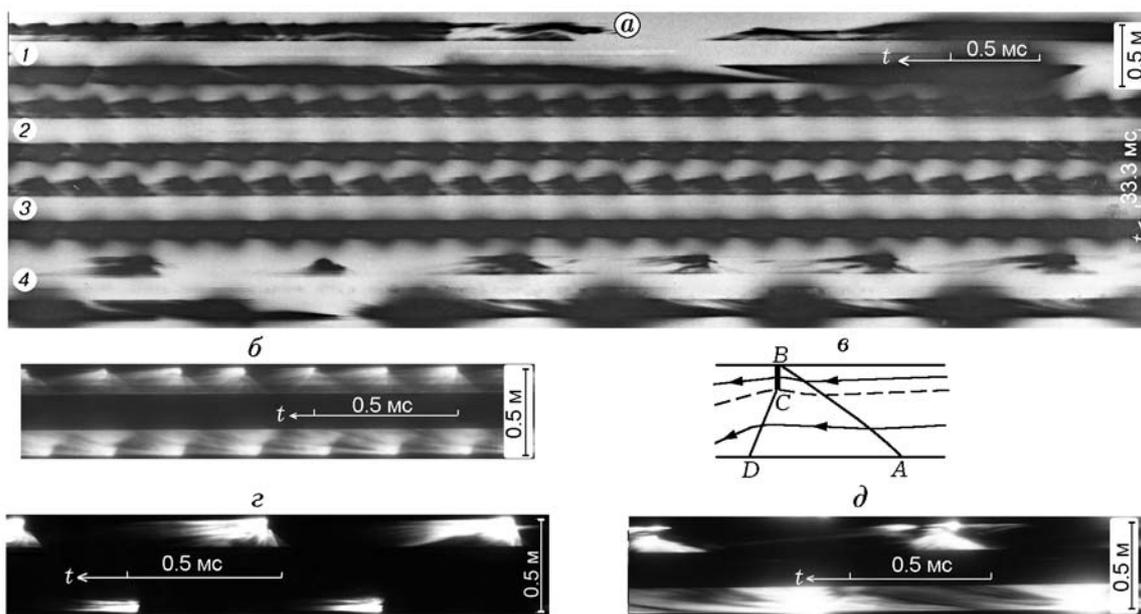


Рис. 2. Характерные фоторегистрограммы (фрагменты) непрерывной спиновой детонации (а, б, г, д), структура волны и течения (в) угольно-воздушной смеси с добавкой водорода

ры данного режима следующие: форсунка воздуха А1, горючего — F1, диаметр выходного отверстия в камере $d_{c2} = 175$ мм, диаметр диафрагмы для добавки водорода $d_e = 4$ мм, начальное давление подачи воздуха $p_{r,a0} = 62 \cdot 10^5$ Па, водорода — $p_{r,H_2} = 65.4 \cdot 10^5$ Па. Уголь в расходомере проталкивался свободным «пористым» поршнем.

Фрагменты фоторегистрограмм включают дорожки, снятые через два окна. После иницирования процесса в камере (яркая вспышка в начале дорожки 1) развивалось горение с появлением тангенциальной неустойчивости — вначале с акустическими волнами, затем (через ≈ 4 мс) и с поперечными детонационными волнами (ПДВ), движущимися слева направо (рис. 2,а). В течение 10 мс шла конкуренция между четырьмя и пятью ПДВ, в процессе которой менялись скорость волн и структура течения. В результате сформировались четыре ($n = 4$) ПДВ, зафиксированные на фоторегистрограмме по дорожкам 2 и 3 (временной интервал между дорожками 33.3 мс). Четное или нечетное количество волн легко определяется по прохождению волн около верхнего и нижнего окон: при четном количестве волн проходят одновременно, при нечетном — со сдвигом на половину периода между волнами. С течением времени скорость волн вдоль цилиндрической поверхности камеры монотонно снижалась от

1.64 до 1.48 км/с. К концу процесса количество волн резко уменьшалось до одной, движущейся со скоростью $D = 1.79 \div 1.48$ км/с (дорожка 4). Затем в течение 10 мс наблюдались неустойчивость волн и ее исчезновение, сопровождавшееся случайными вспышками (не вошли во фрагмент на рис. 2,а). Из увеличенного и переведенного в позитив фрагмента фоторегистрограммы на рис. 2,б видно, что структура детонационных волн непрерывно изменяется, несмотря на постоянство средней скорости вращения. На рис. 2,в приведена схема ПДВ и течения в ее окрестности в системе волны, наиболее часто реализуемая в камерах плоскорadiaльной геометрии с истечением к центру. Здесь BC — детонационный фронт, который образуется за точкой касания с цилиндрической поверхностью предвестника AB — косой ударной волной, формируемой возмущениями, идущими из зоны высокого давления за волной детонации. Часто между крайним левым косым скачком CD (шлейфом) и предвестником AB наблюдается много нестационарных скачков, движущихся вперед и подпитывающих предвестник AB (течение ниже фронта BC околосвуковое [8]). Встречаются также структуры волн, в которых предвестник не поднимается выше точки C , т. е. реализуется как бы нерегулярное отражение волн от цилиндрической поверхности, где ножкой Ма-

Таблица 2

Параметры детонации в камере с использованием «пористого» поршня

Номер дорожки	t , с	G_a , кг/с	G_C^1 , кг/с	G_H , кг/с	g_C , кг/(с·м ²)	ϕ_C	ϕ_H	ϕ_Σ	G_H/G_a , %	G_H/G_C^1 , %	D , км/с	n
1	0.106	7.48	0.225	0.113	11.9	0.34	0.47	0.81	1.5	51	1.77 ± 0.2	$5 \leftrightarrow 4$
2	0.14	6.8	1.3	0.104	69.1	2.15	0.51	2.66	1.53	8.1	1.64	4
3	0.173	6.16	1.28	0.095	67.8	2.34	0.52	2.86	1.54	7.4	1.61	4
4	0.206	5.4	1.36	0.086	72	2.7	0.52	3.22	1.54	6.3	1.69	1

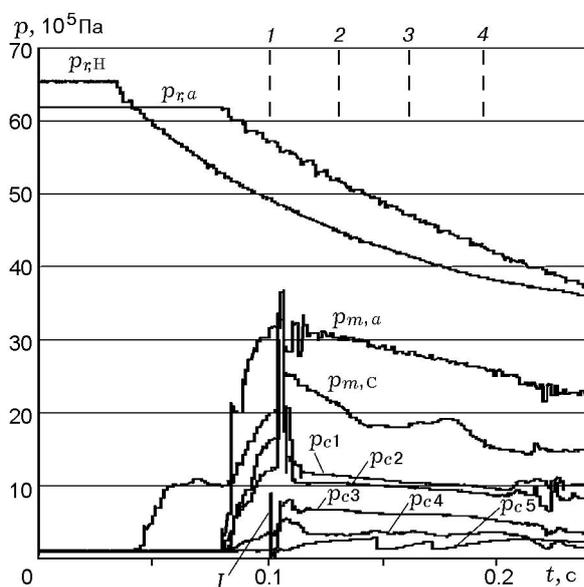


Рис. 3. Осциллограммы давления в системе подачи (p_{rH} , $p_{r,a}$, $p_{m,c}$, $p_{m,a}$) и в камере (p_{ci}) на расстоянии 5, 47, 126, 163 и 250 мм (в центре) от цилиндрической поверхности; I — импульс инициирования; 1–4 — моменты времени, соответствующие середине временных интервалов дорожек 1–4 на рис. 2, а

ха является детонационный фронт BC (см. волны на рис. 2, а, б, г). Имеет место и регулярное отражение предвестника AB от цилиндрической стенки, в результате которого смесь воспламеняется, но без формирования поперечного детонационного фронта BC (рис. 2, д, а также рис. 2, б — третья волна). При регулярном отражении предвестника и одноволновом режиме (см. рис. 2, д) воспламенение смеси происходит с задержкой времени также и за косой ударной волной до момента ее отражения от цилиндрической поверхности.

Осциллограмма давления для режима, представленного на фоторегистрограммах

рис. 2, приведена на рис. 3, а параметры непрерывной детонации — в табл. 2. Здесь t — время, отсчитываемое от момента запуска системы регистрации компьютера, соответствующее середине дорожек 1–4, ϕ_H и $\phi_\Sigma = \phi_C + \phi_H$ — коэффициенты избытка водорода и всей горючей смеси соответственно. Величина ϕ_C рассчитывалась по расходу горючей части угля (G_C^1). Стехиометрическое соотношение воздуха к углю G_a/G_C^1 считалось равным 11.4.

После инициирования среднее статическое давление в камере у периферии (p_{c1}) уменьшалось таким же образом, как ранее при детонации жидких и газообразных горючих в плоско-радиальных камерах [8], а также как при детонации активированного древесного угля в камере диаметром $d_{c1} = 204$ мм [5]. Однако при установке форсунки А2 давление p_{c1} , наоборот, повышалось. Отметим, что эта же форсунка использовалась и для подачи древесного угля [5], где при возникновении детонации давление p_{c1} повышалось. Влияние площади сечения отверстий для воздуха на отмеченное поведение давления в камере пока не выяснено. Расходы воздуха и водорода уменьшались монотонно со временем, а расходы угля в начале процесса были незначительными и возрастали только с развитием детонации, оставаясь практически постоянными до ее окончания (см. табл. 2). При снижении расхода воздуха коэффициент избытка горючего увеличивался. При $\phi_\Sigma = 3.7$ детонационный процесс в камере прекращался.

Уменьшение диаметра выходного отверстия в камере до $d_{c2} = 125$ мм при расходах компонентов, приведенных в табл. 2 для начала эксперимента, повышало давление в камере, которое оказывало влияние на подачу не только угля, но и воздуха (дозвуковое истечение из форсунок). Поэтому достаточно устойчивая детонация длилась всего 0.05 с, а затем сменялась неустойчивостью с признаком пульсирующей

Таблица 3

Параметры детонационных режимов при подаче угля
с помощью вспомогательной пневматической системы

d_e , мм	G_a , кг/с	G_C^1 , кг/с	G_H , кг/с	g_C , кг/(с·м ²)	ϕ_C	ϕ_H	ϕ_Σ	G_H/G_a , %	G_H/G_C^1 , %	p_{c1} , 10 ⁵ Па	p_{c3} , 10 ⁵ Па	D , км/с	n
4	7.37	0.56	0.065	29.7	0.87	0.3	1.17	0.88	11.6	8	6.2	1.4	6
	6.9	1.6	0.076	84.7	2.64	0.37	3	1.1	4.9	8.7	6.5	1.45	4
	5.93	1.4	0.055	74.2	2.69	0.31	3	0.92	3.9	6.8	5.2	1.4	4
3	9.14	0.85	0.081	44.9	1.06	0.3	1.36	0.89	9.5	9.1	7.2	1.86	4
	7.28	2	0.071	106	3.13	0.32	3.43	0.96	3.5	8.4	6	1.38	2
	5.7	1.7	0.059	89.8	3.4	0.35	3.75	1.03	3.5	6.4	4.1	1.42	1
	5.52	1.7	0.057	89.8	3.5	0.35	3.85	1.04	3.4	6	4	1.3	1

щих вдоль диаметра волн и обычным горением. Увеличение выходного отверстия камеры до $d_{c2} = 250$ мм снижало воздействие процессов в камере на систему подачи и стабилизировало детонационные процессы.

Увеличение диаметра диафрагмы для подачи водорода до $d_e = 5$ мм всегда способствовало улучшению детонации, но при этом, как правило, повышались и без того высокие значения отношений G_H/G_a и G_H/G_C . Наоборот, уменьшение диаметра диафрагмы до $d_e = 3$ мм снижало расходы водорода и параметры ПДВ. Поэтому в опытах со свободным поршнем (и для конкретной системы подачи) диаметр отверстия $d_e = 4$ мм можно считать оптимальным в смысле достижения устойчивой детонации угольно-водородной смеси с минимальным содержанием водорода. Однако расход водорода вследствие фильтрации через угольный порошок был достаточно высоким. Для уменьшения доли водорода в смеси применяли сплошной поршень с малым зазором (0.1 мм) и систему его подталкивания. При этом расход водорода за счет фильтрации снижался и определялся в основном диаметром диафрагмы. Опыты проводили в камере с выходным отверстием диаметром $d_{c2} = 250$ мм, диафрагмами диаметром $d_e = 4$ и 3 мм, форсунками воздуха А1 и водорода F3. Начальное давление воздуха устанавливали $p_{r,a0} = 85 \times 10^5$ Па, водорода — $p_{r,H0} = (60 \div 77) \cdot 10^5$ Па. При этой геометрии камеры и параметрах системы подачи были реализованы устойчивые режимы непрерывной детонации в диапазонах расходов $G_a = 10.7 \div 5.5$ кг/с, $G_C = 2.5 \div 0.28$ кг/с, $G_H = 0.102 \div 0.06$ кг/с; коэффи-

циентов избытка горючего $\phi_C = 3.4 \div 0.25$, $\phi_H = 0.4 \div 0.28$, $\phi_\Sigma = 3.75 \div 0.6$. В камере наблюдали от шести до одной ПДВ, движущихся со скоростями $D = 1.86 \div 1.1$ км/с. Параметры этих режимов приведены в табл. 3.

Видно, что минимальные значения $G_H/G_C^1 = 3.9$ и 3.4 % зарегистрированы при большом избытке горючего ($\phi_\Sigma \geq 3$). При меньших значениях ϕ_Σ , например стехиометрии, доля подмешиваемого водорода возрастала примерно до 10 %. Однако это не означает, что при стехиометрии и других условиях подачи горючего данное значение невозможно снизить. Во всех опытах доля подмешиваемого водорода по отношению к воздуху составляла $G_H/G_a \approx 1$ %. Обращают на себя внимание большие удельные расходы угля — $g_C = 106$ кг/(с·м²), что в 500 раз больше реализуемого в высокотехнологичных установках (вихревые камеры сгорания) при обычном сжигании каменного угля ($g_C = 0.2$ кг/(с·м²) [9]). Отметим, что производство мелкодисперсного угля не требует высоких энергетических затрат. При помоле угля затраты энергии на питание электродвигателя мельницы не превышают 1 % калорийности угля даже при КПД электростанции 35 %.

Как и в работе [5], отмечена положительная роль масштабного фактора для осуществления режима непрерывного детонационного сжигания каменного угля. При попытке его сжигания в камере диаметром $d_{c1} = 204$ мм даже при отношении G_H/G_a , близком к стехиометрии, и при $G_H/G_C = 0.67$ энергии, выделившейся как при пережигании проволоочки, так и при горении окружающего водорода, бы-

ло недостаточно для нагрева и воспламенения частиц угля. Угольная смесь, в лучшем случае, горела за пределами камеры. То есть уголь представлял для стехиометрической смеси водорода и воздуха инертную массу, подавляющую детонацию. Пламя снаружи не проникало внутрь камеры по той же причине. Лишь при увеличении времени пребывания угля в камере диаметром $d_{c1} = 500$ мм и при значениях d_{c1}/d_{c2} , меньших даже, чем в камере диаметром $d_{c1} = 204$ мм, были реализованы режимы детонационного сжигания с максимальным количеством ПДВ — $n = 6$. Этого числа волн достаточно, чтобы в камере диаметром $d_{c1} = 204$ мм могла разместиться хотя бы одна волна. То есть в вихревых камерах плоскорadiaльной геометрии не установлена пропорциональная зависимость количества волн от диаметра камеры, хотя в камерах кольцевой цилиндрической геометрии такая зависимость наблюдалась [10].

Очевидно, что при сжигании угля принципиальное значение имеет его внутреннее строение (пористость). Если древесный уголь весь пронизан каналами, а в раздробленном состоянии имеет еще и множество острых кромок, на которых зарождается горение, то каменный уголь, если и пронизан трещинами, то они заполнены водой или минералами. Кроме того, теплопроводность каменного угля, которая повышается со снижением пористости, на порядки выше, чем древесного. Поэтому частицы древесного угля размером 60 мкм горят в детонационных волнах примерно так же [5], как микронные частицы каменного угля.

ВЫВОДЫ

- Впервые в вихревой плоскорadiaльной камере диаметром 500 мм реализована непрерывная спиновая детонация угольно-воздушной смеси с мелкими частицами каменного угля (размером $1 \div 7$ мкм) и добавкой водорода (до 3.4 % к расходу угля и $1.5 \div 0.88$ % к расходу воздуха). Исследованы структуры детонационных волн и течений в их окрестности, оказавшиеся близкими к наблюдаемым при детонации смесей воздуха с жидкими и газообразными горючими.

- Достигнут рекордный удельный расход угля при детонации — $106 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

- Показана роль масштаба камеры в реализации непрерывного детонационного сжига-

ния угля: с увеличением диаметра камеры возможности реализации повышаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А.** Непрерывная и пульсирующая детонация угольно-воздушной смеси // Докл. АН. — 2010. — Т. 431, № 2. — С. 188–190.
2. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А.** Детонационное сжигание угольно-воздушной смеси // Горение твердого топлива: VII Всерос. конф. с междунар. участием: Сб. докл. — 2009. — Ч. 2. — С. 34–38.
3. **Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F., Zholobov Ju. A.** Specific features of detonation combustion of coal // AIS-2010 «Atmosphere, Ionosphere, Safety» / I. V. Karpov (Ed.). — Kaliningrad: Immanuel Kant State University Press, 2010. — P. 78–79.
4. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А.** Детонационное сжигание угольно-воздушной смеси // Энергосбережение и энергоэффективность экономики Кузбасса. — Март 2010. — С. 24–27. — (Тем. вып.: Технологии сжигания твердого топлива).
5. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А.** Детонация угольно-воздушной смеси с добавкой водорода в вихревых плоскорadiaльных камерах // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 4 — С. 109–118.
6. **Егоров А. Г.** Процессы горения порошкообразного алюминия в прямоточных камерах реактивных двигательных установок. — Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2005.
7. **Агроскин А. А., Панина Е. Ф.** Лабораторные работы по химии и технологии угля. — М.: Высш. шк., 1961.
8. **Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф.** Непрерывное детонационное сжигание топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 3. — С. 120–131.
9. **Афанасьев Ю. О., Петрик П. Т., Козлова Г. С., Богомолов А. Р., Кочетков В. Н.** Технология сжигания топливной смеси в гравитационно-рециркуляционной вихревой топке // Горение твердого топлива: VII Всерос. конф. с междунар. участием: Сб. докл. — 2009. — Ч. 2. — С. 8–14.
10. **Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F.** Continuous spin detonations // J. of Propulsion and Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1204–1216.

Поступила в редакцию 31/III 2011 г.