

## ДЕТОНАЦИЯ УГОЛЬНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ДОБАВКОЙ ВОДОРОДА В ВИХРЕВЫХ ПЛОСКОРАДИАЛЬНЫХ КАМЕРАХ

Ф. А. Быковский<sup>1</sup>, С. А. Ждан<sup>1</sup>, Е. Ф. Ведерников<sup>1</sup>, Ю. А. Жолобов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, bykovskii@hydro.nsc.ru

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Приведены результаты экспериментального исследования непрерывной и пульсирующей детонации угольно-воздушной смеси с добавкой водорода в вихревых плоскорадиальных камерах диаметром 204 и 500 мм. Использовался измельченный древесный активированный уголь. Найден способ подачи угольного порошка через узкие каналы путем подмешивания газа на входе в форсунку. В камере диаметром 204 мм впервые реализованы устойчивые режимы непрерывной спиновой детонации с одной или двумя поперечными детонационными волнами со скоростью  $1.8 \div 1.6$  км/с. Частота пульсирующей детонации с радиальными волнами составляла  $4 \div 4.8$  кГц. В камере диаметром 500 мм расширены пределы непрерывной детонации: реализованы режимы непрерывной спиновой детонации, протекающие с большим количеством поперечных волн ( $5 \div 8$ ), движущихся со скоростью  $1.8 \div 1.5$  км/с, снижено количество подмешиваемого к углю водорода до 2.8 %, осуществлено сжигание более крупных частиц топлива благодаря увеличению времени пребывания смеси в камере. В плоскости камеры реконструированы структура волн и течение в их окрестности.

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

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проявляется интерес к исследованиям возможности детонационного сжигания топлива в камерах сгорания двигателей и энергетических установок. Известны два принципа детонационного сжигания: в продольных волнах (пульсирующая детонация), когда детонационная волна распространяется вдоль потока натекающей смеси [1], и в поперечных волнах, когда волна распространяется поперек потока натекающей смеси [2]. Наиболее полный обзор по пульсирующей детонации приведен в работе [3], а по непрерывной детонации с поперечными детонационными волнами — в работах [4–7], в которых исследовалось детонационное сгорание известных газообразных и жидких горючих при использовании в качестве окислителя кислорода и воздуха. Первые результаты, показавшие принципиальную возможность осуществления непрерывного детонационного сжигания угольно-воздушной смеси в плоскорадиальной

кольцевой камере, частично опубликованы в [8].

Цель настоящей работы — продолжить и обобщить результаты исследования по сжиганию в воздухе твердого топлива в спиновых (вращающихся) и/или пульсирующих детонационных волнах в камерах диаметром 204 и 500 мм. В качестве твердого топлива использовался измельченный древесный активированный уголь.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КАМЕРЫ И СИСТЕМА ПОДАЧИ СМЕСЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ

Экспериментальные камеры 1 представляли собой полузамкнутый объем, ограниченный одной цилиндрической и двумя плоскими радиальными стенками, расположенными на расстоянии  $H = 15$  мм друг от друга (рис. 1). Для выхлопа продуктов реакции в одной из плоских стенок имелось отверстие. Воздух и частицы угля подавались в камеру через ряд отверстий 3 и 4, равномерно распределенных по цилиндрической стенке. Для равномерного распределения воздуха и частиц угля по отверстиям служили кольцевые коллекторы 5 и 6. Воздух в коллектор 5 поступал из ресивера (на

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

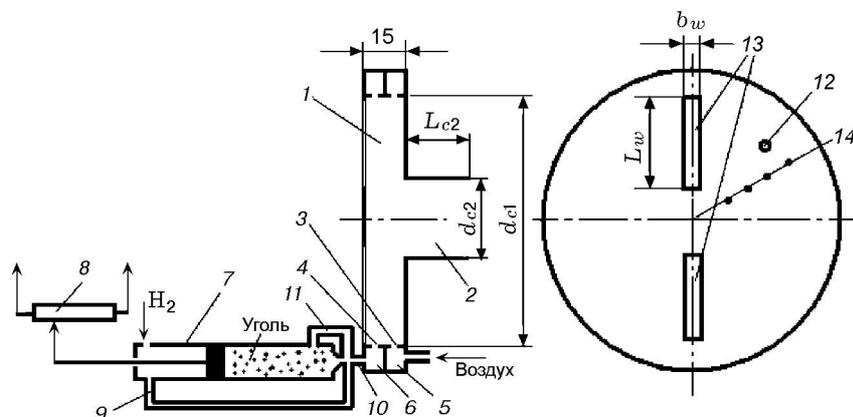


Рис. 1. Схема камеры и системы подачи воздуха и угля:

1 — камера сгорания, 2 — ее выходное отверстие, 3, 4 — отверстия для подачи воздуха и угля, 5, 6 — коллекторы воздуха и угля, 7 — расходомер, 8 — датчик перемещения поршня, 9, 11 — байпасы, 10 — трубопровод, 12 — электрод, 13 — окна из оргстекла, 14 — точки измерения среднего статического давления в камере

рисунке не показан), а частицы угля в коллектор 6 — из расходомера 7, представляющего собой поршневую систему с датчиком перемещения поршня 8. Давление на поршень осуществлялось водородом, поступающим из ресивера. Часть водорода через байпас 9 направлялась в трубопровод 10 и смешивалась с поступающим в коллектор 6 углем. Выдавливание остатков угля из коллектора 6 после перемещения поршня в крайнее правое положение происходило через второй байпас 11, имеющий такую же площадь сечения, как и трубопровод 10 ( $S_t = 2 \text{ см}^2$ ).

### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**Камера диаметром  $d_{c1} = 204 \text{ мм}$ .** Диаметр выходного отверстия 2 этой камеры варьировался в различных опытах —  $d_{c2} = 50, 70$  или  $100 \text{ мм}$ , а длина цилиндрической части оставалась постоянной —  $L_{c2} = 40 \text{ мм}$ . Воздух из ресивера объемом  $V_{r,a} = 10 \text{ л}$  (на рисунке не показан) поступал в коллектор 5, а из него — в камеру, через 100 отверстий 3 сечением  $1 \times 2 \text{ мм}$ , направленных под углом  $60^\circ$  к радиусу. Форсунка угля имела 60 отверстий 4 сечением  $1 \times 1.2 \text{ мм}$ , расположенных в направлении радиуса. Водород подавался из ресивера объемом  $V_{r,H} = 4.1 \text{ л}$  (на рисунке не показан).

Расход воздуха из ресивера в течение опыта (при изменении давления от начального значения  $p_{r,a0} = 80 \cdot 10^5 \text{ Па}$  до конечного  $p_{r,a} = 30 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ) определялся по методике [9] и изменялся в диапазоне  $G_a = 4 \div 1.04 \text{ кг/с}$ . В

расходомер 7 загружалось  $80 \text{ г}$  угля. Начальное давление водорода в ресивере устанавливалось  $p_{r,H0} = 80 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и за время подачи угля в камеру ( $t \approx 0.25 \text{ с}$ ) изменялось в пределах  $p_{r,H} = (63 \div 26) \cdot 10^5 \text{ Па}$ . При этом расход угля в среднем составлял  $G_C \approx 0.3 \text{ кг/с}$ . Истечение водорода через байпас 9 происходило через калиброванный насадок диаметром 3 или  $2.5 \text{ мм}$ , установленный на выходе. Истечение предполагалось критическим и в процессе детонации расход изменялся пропорционально давлению в ресивере —  $G_H = 15 \div 12 \text{ г/с}$ , т. е. не превышал 5 % от расхода угля и 1 % от расхода воздуха.

**Камера диаметром  $d_{c1} = 500 \text{ мм}$ .** Диаметр выходного отверстия камеры 2 составлял  $d_{c2} = 250 \text{ мм}$ , а длина цилиндрической части камеры —  $L_{c2} = 205 \text{ мм}$ . Для подачи воздуха использовался ресивер объемом  $V_{r,a} = 43 \text{ л}$ , а водорода —  $V_{r,H} = 10.3 \text{ л}$ . Расположение, форма и поперечное сечение отверстий форсунок были такими же, как в камере диаметром  $d_{c1} = 204 \text{ мм}$ , но отличалось количество отверстий: для воздуха — 250, для угля — 150.

Начальное давление воздуха в ресивере  $p_{r,a0} = 80 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , водорода в ресивере —  $p_{r,H} = (80 \div 70) \cdot 10^5 \text{ Па}$ . За время оптической регистрации процесса расход воздуха уменьшался от  $G_a = 8.3 \text{ кг/с}$  до  $4 \text{ кг/с}$  при давлении в ресивере  $p_{r,a} = 38 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . В расходомер 7 загружалось  $213 \div 260 \text{ г}$  угля. За время подачи угля в камеру ( $t \approx 0.35 \div 0.4 \text{ с}$ ) расход угля в среднем составлял  $G_C = 0.6 \div 0.65 \text{ кг/с}$ . Истечение водорода через байпас 9 происходило че-

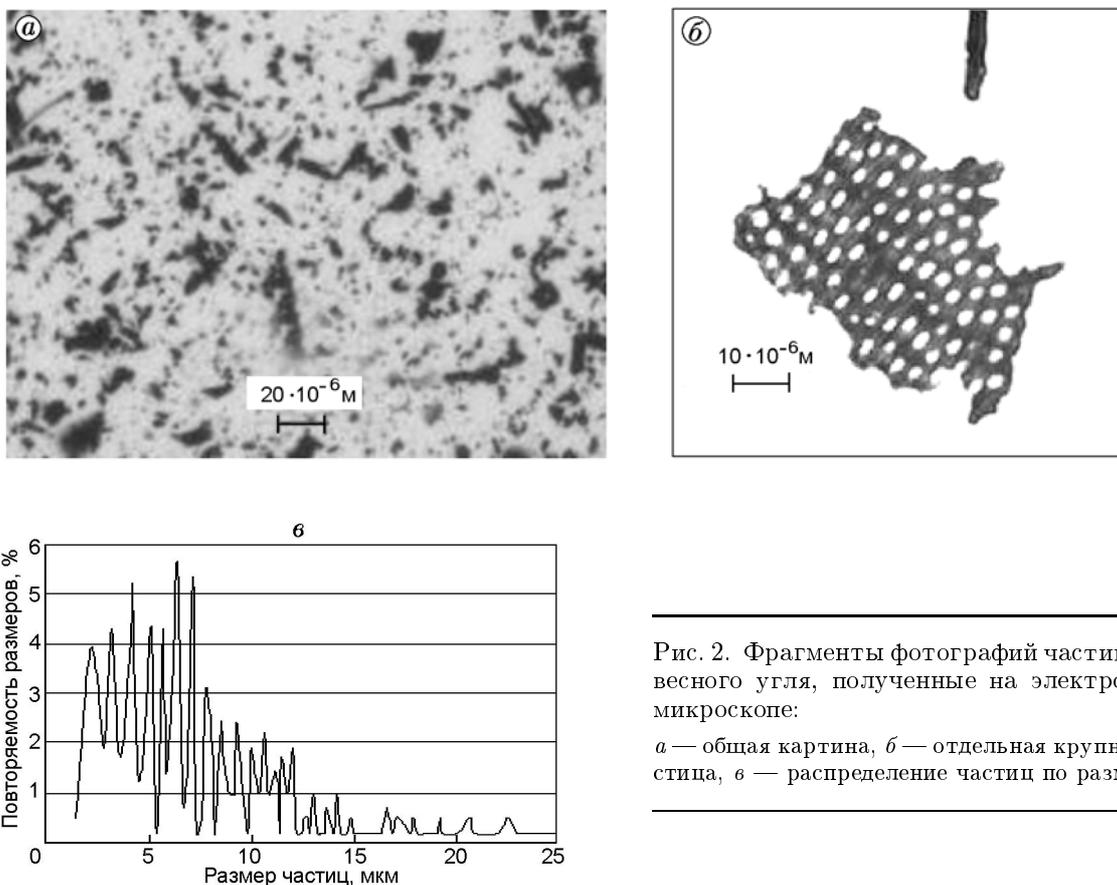


Рис. 2. Фрагменты фотографий частиц древесного угля, полученные на электронном микроскопе:  
*а* — общая картина, *б* — отдельная крупная частица, *в* — распределение частиц по размерам

рез калиброванные насадки диаметром 5, 4 или 3 мм, установленные на выходе. В процессе детонации его расход изменялся пропорционально давлению в ресивере —  $G_{\text{H}} = 54 \div 17 \text{ г/с}$ , т. е. составлял  $9 \div 2.8 \%$  от расхода угля и не превышал  $0.65 \%$  от расхода воздуха.

В каждую из исследуемых камер сначала подавался уголь, а затем воздух. Как только в камере устанавливалось течение воздуха, срабатывала система инициирования. Образующаяся топливоздушная смесь воспламенялась разрядом конденсатора на алюминиевую полоску фольги, помещенную на электрод 12. Энергия разряда составляла  $\approx 5 \text{ Дж}$ . Продукты сгорания вытекали в атмосферу.

Для фотографирования процесса в одну из стенок камер клеивались два окна из оргстекла 13, располагавшиеся вдоль радиуса. В камере  $d_{c1} = 204 \text{ мм}$  длина и ширина окон составляли  $L_w = 68 \text{ мм}$  и  $b_w = 13 \text{ мм}$  соответственно, в камере  $d_{c1} = 500 \text{ мм}$  —  $L_w = 150 \text{ мм}$  и  $b_w = 20 \text{ мм}$ . Края окон отстояли от цилиндрической поверхности камеры на 2 и 3 мм соответственно. Фотосъемка проводилась с помо-

щью фоторегистратора с падающим барабаном [10], в котором направление движения пленки было перпендикулярно длинной стороне окна. При этом все светящиеся объекты, движущиеся в камере в тангенциальном направлении, фиксировались с компенсацией или раскомпенсацией скорости, а вдоль радиуса — на развертку. Длина окна служит масштабом происходящих в камере процессов. Измерялись давления в ресиверах воздуха  $p_{r,a}$  и водорода  $p_{r,H}$ , в коллекторах воздуха  $p_{m,a}$  и угля  $p_{m,C}$ , а также статические давления на стенках камеры  $p_{c,i}$ , осредненные за период между волнами. Измерения проводились датчиками с временным разрешением 1 мс ( $i$  — номер датчика, считая от цилиндрической поверхности). В камере  $d_{c1} = 204 \text{ мм}$  измерения проводились в четырех точках на расстоянии от центра вдоль радиуса 98, 80, 60 и 50 (40) мм соответственно (14), а в камере  $d_{c1} = 500 \text{ мм}$  — в шести точках на расстоянии 245, 205, 163, 123, 87 и 61 мм. Реостатным датчиком 8 регистрировалось перемещение поршня. Сигналы датчиков записывались и обрабатывались компьютером.

В опытах в основном использовался угольный порошок, полученный на дисковой мельнице дезинтеграторного типа Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. Фотография этого порошка и его размеры приведены на рис. 2,а. Характерный размер самых крупных частиц около 20 мкм, между ними находится много микронных частиц и их конгломератов. На рис. 2,б представлена фотография более крупной частицы этого же угля с характерным размером  $\approx 60$  мкм, раздробленного на шаровой мельнице в Новосибирском государственном университете. Видно, что частицы плоские, имеют неровные края, насквозь пронизанные порами размером  $\approx 2$  мкм. Частица, изображенная сверху, возможно, стоит на ребре. На рис. 2,а в самых крупных частицах также просматриваются поры такого же размера. Часть экспериментов выполнена с этим углем более грубого помола. Размер частиц определяли вручную на компьютере с точностью 0.5 мкм. На выделенной площади, содержащей несколько сотен частиц, находили частицы одного характерного размера и определяли их содержание по отношению ко всему количеству частиц. На рис. 2,в приведено распределение по размерам частиц, полученных на дисковой мельнице. Видно, что наибольшее количество частиц имеет размер  $\approx 5$  мкм. Частицы крупнее 22 мкм полностью отсутствуют, но отдельные конгломераты частиц достигают и больших размеров — до 60 мкм. Возможно, толщина этих частиц составляет несколько микрон, на что указывает рис. 2,б. Насыпная плотность угольного порошка равнялась  $0.27 \text{ г/см}^3$ , но после подачи его в коллектор *б* и подмешивания водорода плотность двухфазной смеси уменьшалась из-за достаточно большой объемной концентрации водорода. По оценке удельный объем водорода в коллекторе *б* при  $p_{m,C} = 30 \cdot 10^5$  Па составляет  $\approx 2.5 \cdot 10^2 \text{ см}^3/\text{г}$ , а угля —  $\approx 2 \text{ см}^3/\text{г}$ . Таким образом, при 5%-м содержании водорода в смеси ее плотность в коллекторе оценивается величиной  $\approx 70 \text{ кг/м}^3$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Камера диаметром  $d_{c1} = 204$  мм. В экспериментах впервые реализована непрерывная детонация угольно-воздушной смеси с добавкой водорода. В заданном диапазоне расходов при установке выходных отверстий диаметром  $d_{c2} = 70$  или 100 мм с калиброванным от-

верстием диаметром 3 мм для подачи водорода наблюдалась непрерывная спиновая детонация с поперечными детонационными волнами (ПДВ), скорость которых относительно цилиндрической поверхности составляла  $D = 1.8 \div 1.6 \text{ км/с}$ . В камере с выходным отверстием  $d_{c2} = 50$  мм наблюдалась пульсирующая детонация с радиальными волнами и частотой  $f \approx 4.8 \text{ кГц}$ . На рис. 3,а,б представлены типичные фрагменты фоторегистрограмм этих режимов. Структура ПДВ и течение в их окрестности на фоторегистрограмме (рис. 3,а) искажены, так как линейные скорости волн, движущихся в тангенциальном направлении, уменьшаются к центру, а пленка движется с постоянной линейной скоростью. Поэтому проводилась, как и в работе [4], их реконструкция в плоскости камеры в системе волны (рис. 3,в). Реконструирована также пульсирующая детонационная волна (рис. 3,г).

В начале и конце рассматриваемого режима непрерывной спиновой детонации угольно-воздушная смесь сжигалась в одной ПДВ ( $n = 1$ ), а в середине — в двух ПДВ ( $n = 2$ ), их фоторегистрограмма представлена на рис. 3,а. При  $n = 2$  волны одновременно проходят против окон камеры. На верхней дорожке, снятой через верхнее окно, изображения волн движутся слева направо в направлении движения пленки (с компенсацией скорости), а на нижней — справа налево в противоположном с пленкой направлении (полная раскомпенсация скорости). Поэтому волны на верхней дорожке фиксируются более ярко и отчетливо, а на нижней — размыты и слабее засвечивают пленку. Детонационный фронт *BC* занимает примерно половину окна, а это соответствует половине расстояния от цилиндрической поверхности до выходного отверстия камеры (см. рис. 1). Шлейф *CD* представляет собой ударную волну, движущуюся по продуктам реакции. Прослеживаются две ударные волны: предвестник *AB*, примыкающий к детонационной волне *BC* в точке *B*, и косая волна *MN*, которые тормозят перерасширенный поток в радиальном направлении. Порции сгоревшей смеси во фронте *BC* проходят через косую волну *MN*, попадают в предвестник *AB* и шлейф *CD* следующей волны, а затем покидают пределы камеры. В месте отражения косой волны *MN* от цилиндрической стенки свечение усиливается, возможно, это связано с частичным возгоранием свежей смеси.

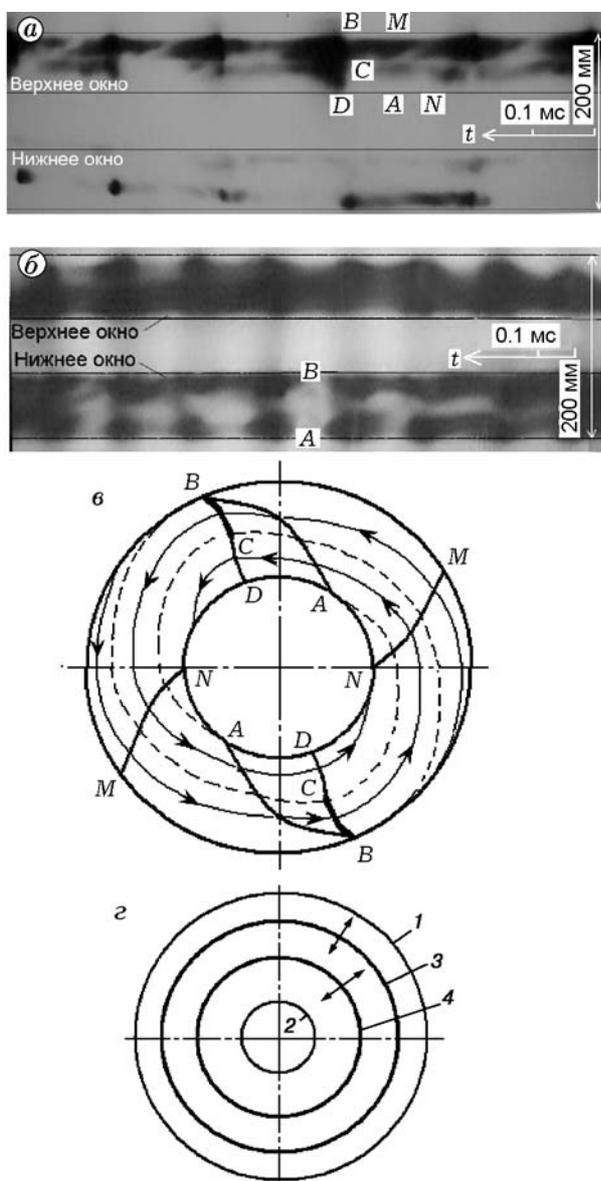


Рис. 3. Фоторегистрограммы детонации угольно-воздушной смеси в камере диаметром  $d_{c1} = 204$  мм (фрагменты):

*a* — непрерывная спиновая детонация,  $d_{c2} = 100$  мм,  $G_a = 2.6$  кг/с,  $\phi \approx 1.3$ ,  $D = 1.6$  км/с,  $n = 2$ ; *b* — пульсирующая детонация с радиальными волнами,  $d_{c2} = 50$  мм,  $G_a = 2.5$  кг/с,  $\phi \approx 1.4$ ,  $f = 4.8$  кГц; реконструкции волн в плоскости камеры: *v* — спиновой детонации, *z* — пульсирующей, 1 — цилиндрическая стенка, 2 — граница выходного отверстия, 3 — детонационная волна, 4 — фронт яркого свечения

На развертках пульсирующих волн (см. рис. 3,б) видны периодически повторяющиеся пучности свечения *A* и *B*, симметрично расположенные относительно центра камеры. Радиальная детонационная волна *A* доходит до цилиндрической стенки, отражается от нее, сноится вниз по потоку до 1/3 длины окна и снова продвигается к цилиндрической стенке. Эти циклы повторяются с частотой  $f = 4 \div 4.8$  кГц. У выхода из камеры синхронно с радиальными волнами видны периодические увеличения яркости *B*, природу которых можно объяснить повышением температуры продуктов, движущихся со сверхзвуковой скоростью и заторможенных в скачке уплотнения, который появляется в сужающемся канале. На реконструированной в плоскости камеры схеме пульсирующей детонации (см. рис. 3,з) между цилиндрической стенкой 1 и отверстием 2 вдоль радиуса перемещается детонационная волна 3, переходящая в ударную при отражении от стенки 1, и синхронно с волной 3 движется фронт яркого свечения 4.

В пучностях свечения у периферии камеры (*A*) скорость движения фронта свечения в радиальном направлении определяется по известной формуле  $v = kv_{ph} \operatorname{tg} \alpha$ , где  $k = 28.6$  — коэффициент уменьшения изображения,  $v_{ph} = 100$  м/с — скорость пленки,  $\alpha \approx 15^\circ$  — максимальный угол наклона светящейся области к направлению движения пленки. Подставляя эти значения в формулу, получаем  $v \approx 770$  м/с. С учетом радиальной составляющей скорости потока скорость волны относительно смеси приближается к 1000 м/с. Эта скорость — сверхзвуковая относительно смеси, соответствует детонационной, но далека от скорости идеальной детонации Чепмена — Жуге. Вопрос о структуре волн и течений при пульсирующей детонации требует дальнейшего изучения.

Параметры детонации для типичных режимов при различных значениях выходного диаметра отверстий  $d_{c2}$  представлены в табл. 1, а давления, соответствующие этим режимам, — в табл. 2.

Непрерывная спиновая детонация при  $d_{c2} = 100$  мм наблюдалась в диапазоне расхода воздуха  $G_a = 3.2 \div 2.4$  кг/с, коэффициента избытка горючего по углю  $\phi = 1.08 \div 1.6$ , давления вблизи цилиндрической поверхности камеры  $p_{c1} = (9.3 \div 6.8) \cdot 10^5$  Па. В камере с выходным диаметром  $d_{c2} = 70$  мм непрерывная

Таблица 1

$d_{c2}$ , мм	$G_a$ , кг/с	$\phi$	$D$ , км/с	$n$	$f$ , кГц
100	3.2 → 3	1.08 → 1.2	1.56	1	—
	3 → 2.4	1.2 → 1.44	1.6	2	—
	2.4 → 2.2	1.44 → 1.6	1.6	1	—
70	2.4 → 1.7	1.44 → 2.04	1.8	1	—
50	3 → 1.9	1.15 → 1.8	—	—	4.3 → 4.8 → 4

Таблица 2

$d_{c2}$ , мм	$p_{r,a}$	$p_{r,H}$	$p_{m,a}$	$p_{m,H}$	$p_{c1}$	$p_{c4}$
	$10^5$ Па					
100	62 → 60	44 → 42	51.6 → 50	10 → 9.6	9.3 → 8.7	5.2 → 5
	60 → 50.2	42 → 37.6	50 → 41.9	9.6 → 8	8.7 → 7.4	5 → 4.7
	50.2 → 48.3	37.6 → 36.5	41.9 → 40.4	8 → 7.3	7.4 → 6.8	4.7 → 3.6
70	48.6 → 39.9	46.6 → 39.9	40.4 → 33	12.5 → 12.2	12.5 → 11.2	9 → 8.4
50	59.5 → 40.5	43.8 → 33.7	50.1 → 33.7	26.2 → 17.8	25 → 16.5	21 → 14.4

спиновая детонация существовала при меньших расходах воздуха ( $G_a = 2.4 \div 1.7$  кг/с), но больших концентрациях угля ( $\phi = 1.44 \div 2.04$ ) и давлениях в начале камеры ( $p_{c1} = (12.5 \div 11.2) \cdot 10^5$  Па).

При пульсирующей детонации ( $d_{c2} = 50$  мм) и тех же расходах воздуха, что и для непрерывной спиновой детонации, процессы в камере протекали при больших в 1.5–2 раза давлениях. Наибольшие частоты продольной пульсирующей детонации и скорости ПДВ наблюдались при  $\phi = 1.5 \pm 0.2$  и расходе водорода, подмешиваемого в уголь,  $G_H \approx 15$  г/с.

Характерная осциллограмма параметров процесса приведена на рис. 4. По мере истечения газов из ресиверов давления подачи компонентов уменьшаются, соответственно уменьшаются и давления в камере. Момент иницирования процесса отмечен импульсом  $I$ , отображающим появление тока во взрывающейся проволочке. Началу вытеснения угля соответствует резкая остановка поршня (кривая  $L$ ). Но это не значит, что прекратилась подача угля в камеру. Окончание подачи угля определялось по приходу поршня в крайнее правое положение и росту давления на стенке коллектора угля  $p_{m,C}$  в результате заполнения коллектора водородом через байпас  $11$ . Средний расход угля определялся по его известной порции (80 г) и времени вытеснения.

Использование для подачи водорода ка-

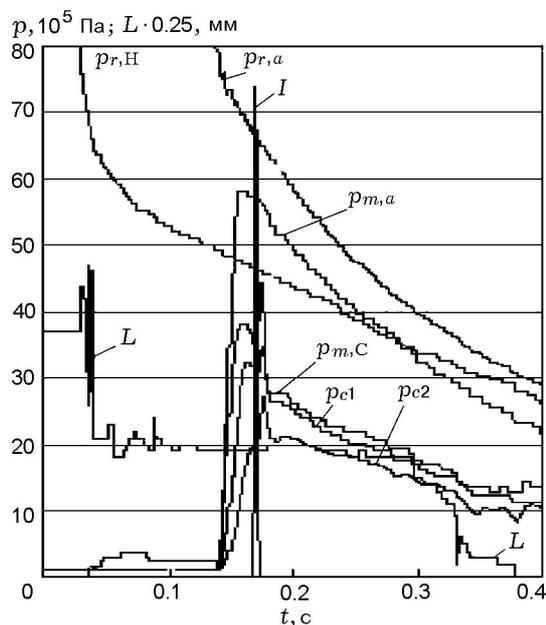


Рис. 4. Осциллограмма параметров процесса в камере диаметром  $d_{c1} = 204$  мм (опыт с  $d_{c2} = 50$  мм)

либрованного отверстия диаметром 2.5 мм примерно в 1.5 раза снизило расход водорода, и при  $G_H/G_C \leq 0.035$  возбудить в камере детонацию и даже горение не удалось. Также не была реализована в камере детонация при использовании крупных частиц угля при отношении



Рис. 5. Характерная фоторегиограмма непрерывной спиновой детонации угольно-воздушной смеси в камере диаметром  $d_{c1} = 500$  мм (фрагмент):

$d_{c2} = 250$  мм,  $G_a = 5.2$  кг/с,  $G_C \approx 0.62$  кг/с,  $\phi \approx 1.38$ , уголь мелкого помола,  $D = 1.65$  км/с,  $n = 7$ , доля подмешанного к углю водорода  $G_H/G_C = 0.038$ , давление вблизи цилиндрической поверхности камеры  $p_{c1} = 5.5 \cdot 10^5$  Па, давление у выходного отверстия камеры  $p_{c4} = 3.5 \cdot 10^5$  Па

$G_H/G_C \geq 0.05$ . В последнем случае обычное горение с признаками неустойчивости держалось в камере не более 5 мс, а затем сносилось за ее пределы.

**Камера диаметром  $d_{c1} = 500$  мм.** В этой камере непрерывная спиновая детонация угольно-воздушной смеси с добавкой водорода реализована не только для частиц мелкого помола (рис. 5), но и для крупных частиц угля. В первом случае при установке калиброванной диафрагмы диаметром 4 мм удалось снизить добавку водорода к углю до 2.8 %. Непрерывная спиновая детонация при  $d_{c2} = 250$  мм наблюдалась в диапазоне расхода воздуха  $G_a = 8 \div 4.2$  кг/с, коэффициента избытка горючего по углю  $\phi = 1.03 \div 1.7$ , давлений на входе и выходе из камеры  $p_{c1} = (7.5 \div 4.4) \cdot 10^5$  Па и  $p_{c2} = (5 \div 3) \cdot 10^5$  Па соответственно. Скорость детонационных волн относительно цилиндрической поверхности составляла  $D = 1.8 \div 1.5$  км/с, их количество —  $n = 8 \div 5$  (большой скорости и числу волн соответствовал коэффициент избытка горючего  $\phi \approx 1$ ). При отношении  $G_H/G_C < 0.028$ , обеспечиваемом установкой диафрагмы с отверстием диаметром 3 мм, в камере реализовано обычное горение.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Детонация метана с угольной пылью в шахтах, как стихийное явление, случается достаточно часто. Ее развитию способствуют протяженность и большой диаметр туннелей, а также их загроможденность. Имеются работы, в которых описаны натурные эксперименты по возбуждению детонации метановоздушной смеси в шахтах [11], в широких трубах

большой длины [12]. В лабораторных условиях в экспериментах с трубами малого диаметра детонацию угольно-воздушных смесей возбудить не удалось. Например, в трубе диаметром 50 мм и длиной  $\approx 3$  м детонация угольной пыли (частицы характерного размера 25 или  $45 \div 65$  мкм с содержанием летучих 16 % в первом случае и 32 % во втором) при атмосферном давлении возбуждалась ударной волной и только при использовании чистого кислорода [13]. Снижение доли кислорода в газе до 84 % при его разбавлении воздухом уже не вводило детонацию на стационарный режим, а при использовании чистого воздуха инициирующая волна вообще затухала. Причины — малая длина и диаметр трубы, достаточно большой размер частиц, слабая ударная волна и малое начальное давление угольно-воздушной смеси. Расчеты, которые не связаны ограничениями по размерам трубы, показали [14], что детонация взвеси угольной пыли в воздухе с размером частиц 20 мкм и содержанием летучих 5 % возможна только при концентрации метана в воздухе более 3 %. Отметим, что данные исследования проводились для покоящейся угольно-воздушной смеси при атмосферном и ниже атмосферного давлении.

В движущихся смесях в условиях повышенного тепло- и массообмена условия для воспламенения и обычного турбулентного горения смеси улучшаются [15, 16]. Отмечается, что более полному сгоранию угля способствуют уменьшение размеров частиц угля, увеличение давления в камере и скорости потока, улучшение смесеобразования. Наши исследования непрерывной детонации газовых и газокпельных горючих смесей [4, 6, 7, 17] полностью соответствуют этим положениям для обычного горения.

В камере диаметром  $d_{c1} = 204$  мм, благодаря своеобразной вихревой структуре течения [18], удалось реализовать режимы непрерывной спиновой детонации топливно-воздушных смесей [7], в том числе метановоздушных, керосиновоздушных и смеси дизельного топлива с воздухом. При этом переход от момента инициирования до развития детонации составлял десятые доли миллисекунды [17, 19]. Особенности смесеобразования угольно-воздушной смеси таковы, что здесь не требуется дробления струй горючего на мелкие фрагменты — они приготовлены заранее. Необходимо обеспечить их равномерное распределение в потоке возду-

ха в области распространения фронта детонационной волны. Вихревая структура течения позволяет выполнить это требование. Мало того, более плотные частицы, например пустой породы, могут оттесняться в пограничные слои течения [20] и не мешать протеканию химической реакции.

Однако появляются трудности при кратковременной подаче угольного порошка в камеру, обусловленные его физическими свойствами. При стационарных и длительных подачах сыпучих тел решения этих проблем найдены в экспериментах [21, 22], в которых порошок насыщался воздухом сквозь пористый поршень, толкающий частицы. В нашем случае в плоскорadiaльной камере при отсутствии подмешивания газа через байпас 9 (см. рис. 1) и давлении подачи в ресивере  $p_{r,н} = 60 \cdot 10^5$  Па (и над поршнем) статическое давление на стенке коллектора 6 оставалось прежним —  $p_{m,н} = 1 \cdot 10^5$  Па. Подобная картина наблюдалась и при проталкивании угля без поршня. То есть столб угля не успевал профильтровать газ и передавал давление вдоль себя как твердое тело. Это явление отмечается в некоторых работах с сыпучими веществами как «давление каркаса» [23]. Давление на стенке возрастало только после подъема давления в камере при поступлении в нее воздуха. По-видимому, на малом расстоянии происходило проникновение звуковых волн в коллектор и давление в нем повышалось на величину, превышающую давление в камере на  $(1 \div 2) \cdot 10^5$  Па. Влияние давления в камере на давление в коллекторе угля наблюдалось и при подмешивании воздуха и водорода. И в этих случаях перепады давления на форсунке находились в тех же пределах (см. рис. 4 и табл. 2). На перепад давления не оказывали влияния вариации давления  $p_{r,н} = (60 \pm 20) \cdot 10^5$  Па и его снижение в камере за счет двойного уменьшения расхода воздуха. Подобная ситуация наблюдалась для всех камер ( $d_{c2} = 50, 70$  и  $100$  мм — см. табл. 2): давление в коллекторе угля отслеживало давление в камере и разница между ними практически не менялась. Истечение угольно-водородной смеси из коллектора в камеру было дозвуковым, а в воздушной форсунке устанавливалось звуковое истечение.

В камере диаметром  $d_{c1} = 204$  мм не удалось возбудить детонацию угольно-воздушной пыли без добавки водорода даже при инициировании детонатором с массой взрывчатого веще-

ства  $0.4$  г. В этих опытах для проталкивания через форсунку угольных частиц использовалась подача в коллектор воздуха. Древесный уголь не содержит горючих летучих по определению. Поэтому в их отсутствие химическая реакция на поверхности угля могла быть только гетерогенной. Не помогла продувка угля метаном с расходом, составляющим около 17 % от расхода угля или 1.7 % от расхода воздуха при подрыве детонатора с массой взрывчатого вещества  $0.2$  г. По данным расчетов [14] при атмосферном давлении детонация в такой смеси не может распространяться. Не создали условий для детонации вихревое течение и повышенное давление в плоскорadiaльной камере. Не удалось инициировать детонацию взвеси частиц угля в потоке кислорода и продувкой угля кислородом при соотношении компонентов, близком к стехиометрии (иницирование провололочкой). А при увеличении расхода кислорода в два раза ( $\phi \approx 1/2$ ) и соответственно увеличении давления в камере произошло инициирование детонации с разрушением камеры. Предположительно, при нагреве кислорода в результате заброса продуктов в коллектор 5 (см. рис. 1) произошло прожигание форсунки и стенки камеры.

Таким образом, проведенные опыты показали, что для детонационного сжигания взвеси частиц угля в воздухе необходима горючая газовая фаза, продукты горения которой способствуют нагреву частиц и гетерогенной реакции на их поверхности. Горению частиц угля способствует большая площадь контакта с газом за счет пористости, а также неровные острые края (см. рис. 2, *a, б*), которые нагреваются в первую очередь. В наших опытах непрерывная и пульсирующая детонация были реализованы при добавке водорода.

Пределы детонации угольно-воздушной смеси в камере  $d_{c1} = 500$  мм удалось расширить как по минимальному количеству подмешиваемого к углю водорода (до 2.8 %), так и по максимальному характерному размеру частиц угля — до 60 мкм. Удельные расходы смеси  $g_{\Sigma} = (G_C + G_a + G_H)/S_c$  ( $S_c$  — площадь цилиндрической поверхности камеры) для камер обоих размеров были примерно одинаковы.

В режиме непрерывной спиновой детонации у цилиндрической поверхности камеры  $d_{c1} = 500$  мм зарегистрировано давление на  $30 \pm 5$  % выше, чем при холостом пуске (истечения холодных компонентов), при одинако-

вых расходах компонентов. Для камер цилиндрической геометрии такое поведение давления закономерно, но давление в них обычно повышается в несколько раз [24]. В камере диаметром  $d_{c1} = 204$  мм при непрерывной спиновой детонации давление в этой области, наоборот, снижалось примерно на  $20 \div 30$  % по сравнению с истечением холодных продуктов. Эта особенность наблюдалась и ранее при использовании в качестве горючего газов или жидкостей [4, 17]. Объяснение, подтвержденное расчетом, было простое — при развитии детонации продукты (ввиду снижения их плотности) создают меньшие, чем холодные продукты, центробежные силы у цилиндрической поверхности камеры и, следовательно, меньшее давление. Таким образом, можно подобрать камеру такого диаметра, в которой у периферии давление при возникновении непрерывной спиновой детонации не изменится. Но на выходе из камеры давление при детонации всегда было больше, чем при истечении холодных смесей, для всех камер и режимов.

Обращает на себя внимание непропорциональное значению диаметра увеличение количества волн в большой камере. Вместо ожидаемых  $n = 3 \div 5$  реализовывалось  $n = 5 \div 8$  волн, имеющих примерно одинаковую высоту поперечного детонационного фронта  $BC - h \approx 5$  см (см. рис. 3, а и рис. 5). По-видимому, снижение воздействия центробежных сил увеличивает радиальную составляющую скорости потока и ускоряет формирование детонационно-способного слоя  $BC$ .

### ВЫВОДЫ

- В вихревой плоскорadiaльной камере диаметром 204 мм впервые реализована непрерывная спиновая и радиальная пульсирующая детонация угольно-воздушной смеси с добавкой водорода (менее 5 % от расхода угля и 1 % от расхода воздуха), позволяющего осуществить подачу частиц угля и начальную реакцию в газовой фазе.

- В камере диаметром 500 мм расширены пределы существования непрерывной спиновой детонации: она реализуется при подмешивании к углю до 2.8 % водорода (по отношению к воздуху — менее 0.65 %) и сжигании более крупных частиц угля ( $\approx 60$  мкм).

- Найден способ подачи угольного порошка через узкие каналы путем подмешивания газа на входе в форсунку.

- Показано, что детонация угольно-воздушной смеси может распространяться только при наличии горючей газовой добавки (в данном случае водорода), а гетерогенные реакции на поверхности частиц угля играют вторичную роль, однако обеспечивают при этом максимальное тепловыделение.

- При непрерывной спиновой и пульсирующей детонации на периферии камеры малого диаметра происходит снижение давления по сравнению с давлением при истечении холодных продуктов. В камере большого диаметра с выходным отверстием диаметром 250 мм, наоборот, при непрерывной спиновой детонации возрастают как давление в камере, так и количество поперечных детонационных волн.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ. — 1940. — Т. 10, вып. 17. — С. 1453–1461.
2. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 129, № 6. — С. 1254–1256.
3. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective // Progress in Energy and Combust. Sci. — 2004. — V. 30. — P. 545–672.
4. 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.
5. Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F. Continuous spin detonations // J. Propulsion and Power. — 2006. — V. 22, № 6. — P. 1204–1216.
6. Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф., Ползов С. В., Голубев Ю. В. Иницирование детонации в потоках водородно-воздушных смесей // Импульсные детонационные двигатели / под ред. С. М. Фролова. — М.: Торус Пресс, 2006. — С. 521–540.
7. Bykovskii F. A., Vedernikov E. F., Polozov S. V., Golubev Yu. V. Initiation of detonation in a vortical flow hydrogen-air mixtures // Pulsed and Continuous Detonations / G. Roy, S. Frolov, J. Simibaldi (Eds). — Moscow: Torus Press, Ltd., 2006. — P. 326–331.
8. 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.

9. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Исследование непрерывной спиновой детонации водородокислородных смесей. 3. Методики измерения параметров потока и структура течения в камерах сгорания различной геометрии // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 87–97.
10. **Быковский Ф. А.** Высокоскоростной ждущий фоторегистратор // Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии. — 1981. — № 2. — С. 85–89.
11. **Cybulski W. B.** Detonation of coal dust // Bull. Acad. Polon. Sci. Ser. Sci. Techn. — 1971. — V. 19, N 5. — P. 37–41.
12. **Быков А. М., Прозоров А. Н.** Возможность возникновения сильных взрывов угольной пыли в тупиковых выработках небольшой протяженности // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 1. — С. 153–154.
13. **Эдвардс Д., Фернлей Р., Неттлтон М.** Исследование детонации взвесей угольной пыли в смесях кислорода с азотом в ударной трубе // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 2. — С. 129–136.
14. **Левин В. А., Туник Ю. В.** Инициирование детонационного горения угольной пыли в метановоздушной смеси // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 1. — С. 3–8.
15. **Канторович Б. В.** Основы теории горения и газификации твердого топлива. — М.: Изд-во АН СССР, 1958.
16. **Канторович Б. В., Миткалинный В. И., Десягин Г. Н., Иванов В. М.** Гидродинамика и теория горения потока топлива. — М.: Металлургия, 1971.
17. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф., Полозов С. В., Голубев Ю. В.** Инициирование детонации в потоках топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 3. — С. 110–120.
18. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 2. Вихревая структура течения // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 1. — С. 41–49.
19. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф.** Исследование самовоспламенения и особенностей течения в плоской вихревой камере // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 6. — С. 26–41.
20. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 1. Экспериментальное исследование поля скоростей в переходном и стационарном режимах // ПМТФ. — 1999. — Т. 40, № 6. — С. 112–121.
21. **Малинин В. И., Коломин Е. И., Антипин И. С.** Воспламенение и горение азровзвеси алюминия в реакторе высокотемпературного синтеза порошкообразного оксида алюминия // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 5. — С. 41–51.
22. **Егоров А. Г.** Процессы горения порошкообразного алюминия в прямоточных камерах реактивных двигательных установок. — Самара: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 2005.
23. **Ахатов И. Ш., Вайнштейн П. Б.** Нестационарные режимы горения пористых порохов // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 3. — С. 53–61.
24. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Исследование непрерывной спиновой детонации водородокислородных смесей. 1. Камеры кольцевой цилиндрической геометрии // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 2. — С. 32–45.

*Поступила в редакцию 1/VI 2010 г.,  
в окончательном варианте — 24/XI 2010 г.*