

УДК 534.2,546.2

ДЕТОНАЦИОННОЕ СЖИГАНИЕ ЧАСТИЦ АНТРАЦИТА И БУРОГО УГЛЯ В ПРОТОЧНОЙ РАДИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ

Ф. А. Быковский¹, С. А. Ждан^{1,2}, Е. Ф. Ведерников¹, Ю. А. Жолобов²

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

²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Исследованы режимы непрерывной спиновой детонации частиц антрацита и бурого угля в потоке воздуха в вихревой радиальной камере диаметром 500 мм с постоянной (вдоль радиуса) площадью сечения. Использован измельченный уголь размером $1 \div 12$ мкм. Для транспортирования угля в камеру и промотирования химической реакции на поверхности твердых частиц подмешивали водород или синтез-газ в соотношении $\text{CO}/\text{H}_2 = 1/1, 1/2$ и $1/3$. Впервые реализована непрерывная спиновая детонация двухфазных смесей дисперсных частиц антрацита и бурого угля с воздухом при добавке водорода до 4 % от расхода угля. Количество подмешиваемого к углю синтез-газа возрастало с уменьшением в нем доли водорода — 14, 21 и 27 % для антрацита и 11, 20 и 29 % для бурого угля при $\text{CO}/\text{H}_2 = 1/3, 1/2$ и $1/1$ соответственно. Структура детонационных волн и течение в их окрестности принципиально не отличались от наблюдаемых ранее для длиннопламенного каменного и древесного углей. Более высокие скорости детонации зафиксированы для более энергоемких углей (антрацита). В холостых запусках по сравнению с детонацией при одинаковых удельных расходах угольно-воздушных смесей наблюдалось повышенное давление у цилиндрической поверхности камеры.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, вихревая плоскорadiaльная камера сгорания, каменный уголь, структура течения.

DOI 10.15372/FGV20160610

ВВЕДЕНИЕ

Известные способы сжигания твердых топлив в воздухе малопродуктивны и требуют больших габаритов топочных устройств [1]. От них отличается способ сжигания топлива в поперечных детонационных волнах (ПДВ) [2]. В этом случае размер камер сгорания определяется размером детонационной волны, а удельные (отнесенные к площади поперечного сечения канала) расходы топлива увеличиваются в десятки и сотни раз. В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН в вихревых плоскорadiaльных камерах диаметром 204 и 500 мм детонационным способом в режиме непрерывной спиновой детонации (НСД) удалось сжигать в потоке воздуха частицы древесного активированного угля [3–5], а в камерах диаметром 500 мм — частицы

кузбасского каменного длиннопламенного угля [5–7] в потоке воздуха. Для транспортировки угольных частиц в камеру сгорания использовался водород, который одновременно служил промотором химической реакции в детонационной волне.

Цель настоящей работы — реализация и изучение НСД гетерогенных смесей частиц антрацита и бурого угля в воздухе с добавкой горючего газа (водород, синтез-газ) в проточной вихревой радиальной камере диаметром 500 мм. Использовались помолы антрацита Листвянского месторождения Новосибирской области и бурого угля Канско-Ачинского месторождения, а в качестве транспортного средства в камеру сгорания — водород и синтез-газ.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема вихревой радиальной камеры диаметром $d_{c1} = 500$ мм с истечением к центру приведена на рис. 1. Экспериментальная камера 1 представляла собой полузамкнутый объем, ограниченный цилиндрической и двумя боковыми стенками — плоской и конической с углом наклона от основания $\alpha \approx 7^\circ$. Выбранная

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00080) и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ 2695.2014.1).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А., 2016.

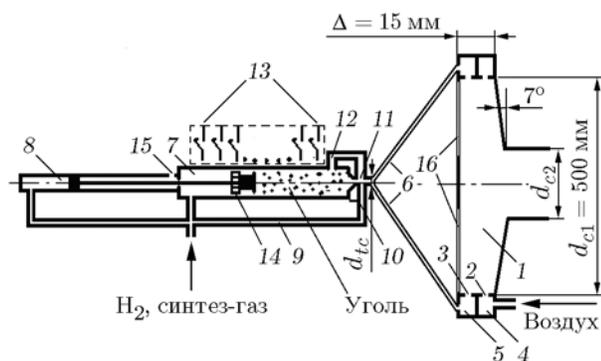


Рис. 1. Схема камеры и система подачи угля:

1 — камера сгорания, 2 — каналы кольцевой щели, 3 — форсунка, 4 — кольцевой коллектор воздуха, 5 — кольцевой коллектор частиц угля, 6 — трубки, 7 — основная поршневая система, 8 — вспомогательная поршневая система, 9 — байпас, 10 — отверстие диафрагмы, 11 — трубопровод, 12 — второй байпас, 13 — герконы, 14 — кольцевой магнит, 15 — дренажное отверстие, 16 — радиальные окна

геометрия камеры обеспечивала примерно постоянную площадь ее сечения вдоль радиуса: $S_c = \pi d_{c1} \Delta = 235.6 \text{ см}^2$, где $\Delta = 15 \text{ мм}$ — расстояние между стенками у цилиндрической поверхности камеры. Выхлоп продуктов реакции из камеры происходил через отверстие диаметром $d_{c2} = 250, 175$ или 125 мм , расположенное в конической стенке.

Двухфазную смесь угля с горючим газом подавали в камеру сгорания через форсунку 3, имеющую 150 отверстий с площадью поперечного сечения $0.5 \times 1 \text{ мм}$, равномерно распределенных по цилиндрической стенке и направленных вдоль радиуса. Воздух в камеру подавали сквозь 50 каналов 2, образованных в кольцевой щели шириной $\delta = 5 \text{ мм}$ ребрами толщиной $\delta_p = 1 \text{ мм}$ и наклоненных к радиусу под углом $\beta = 75^\circ$. Закрутка воздуха в камере осуществлялась направляющими ребрами с минимальным расстоянием между ними 10 мм. Площадь проходного сечения щели воздуха на входе в камеру равна $S_\delta = (\pi d_{c1} - 50\delta_p)\delta = 76.04 \text{ см}^2$, а коэффициент расширения камеры сгорания $K_S = S_c/S_\delta = 3.1$.

Для распределения воздуха и частиц угля по отверстиям служили кольцевые коллекторы 4 и 5 соответственно. Кроме того, для более равномерного распределения взвеси частиц угля по коллектору 5 использовали 24 трубки 6. Воздух в коллектор 4 поступал из ресивера объемом 43 л (на рисунке не показан), а

частицы угля в коллектор 5 — из расходомера, представляющего собой основную 7 и вспомогательную 8 поршневые системы. Давление на поршни осуществлялось горючим газом: водородом, поступающим из ресивера объемом 10.3 л, или синтез-газом — из ресивера объемом 13.3 л, где проводилось и его приготовление [8] (на рисунке не показаны). Часть горючего газа через байпас 9 и регулируемое отверстие диафрагмы 10 (диаметром 4 или 6 мм) подавали в трубопровод 11 и подмешивали к поступающему в коллектор 5 углю. Выдавливание остатков угля из коллектора 5 после перемещения поршня в крайнее правое положение происходило подачей горючего газа через второй байпас 12. Ход поршня, выталкивающего уголь, дискретно фиксировали магнитно-управляемыми датчиками (герконами) 13, расположенными на наружной поверхности цилиндра и замыкающими электрическую цепь при прохождении кольцевого магнита 14, находящегося на поршне. Возможные утечки горючего газа через уплотнение штока основной поршневой системы и поршень вспомогательной стравливали через дренажное отверстие 15. Толкающий уголь поршень имел зазор со стенкой цилиндра 0.1 мм, поэтому насыщение угля горючим газом происходило и через этот зазор, а не только через байпас.

Воздух и горючие добавки

Устанавливаемые в опытах начальные давления в ресиверах воздуха ($p_{r,a0}$) и водорода или синтез-газа ($p_{r,f0}$), а также расходы воздуха (G_a) и водорода и синтез-газа (G_f) приведены в табл. 1. Расходы газов определяли по снижению давления в ресиверах [5]. Там же указаны коэффициенты избытка газового горючего $\phi_f = \chi_0(G_f/G_a) = G_f/G_{f,st}$, где $G_{f,st}$ — расход газообразного горючего, соответствующий стехиометрическому соотношению с воздухом, а $\chi_0 = G_a/G_{f,st}$ — стехиометрический коэффициент. Для каждой топливовоздушной смеси коэффициент χ_0 имеет одно определенное значение: для водорода — 33.64, синтез-газа — 4.576, 6.435 и 8.075 для составов $\text{CO}/\text{H}_2 = 1/1, 1/2$ и $1/3$ соответственно.

Дисперсная фаза — угли

Помолы антрацита и бурого угля производили на дисковой мельнице дезинтеграторного

Таблица 1
 Параметры подачи воздуха и добавок горючих газов в камеру

Добавка	$p_{r,a0}, 10^5 \text{ Па}$	$p_{r,f0}, 10^5 \text{ Па}$	$G_a, \text{ кг/с}$	$G_f, \text{ кг/с}$	ϕ_f
H ₂	85 ± 1	77 ± 1	11.6 ÷ 5.1	0.14 ÷ 0.04	0.44 ÷ 0.15
CO + H ₂	60	80	7.8 ÷ 0.8	1.17 ÷ 0.22	0.73 ÷ 0.35
CO + 2H ₂	60	70	7.2 ÷ 0.9	0.67 ÷ 0.08	0.68 ÷ 0.38
CO + 3H ₂	60	60	7.6 ÷ 0.9	0.45 ÷ 0.05	0.49 ÷ 0.26

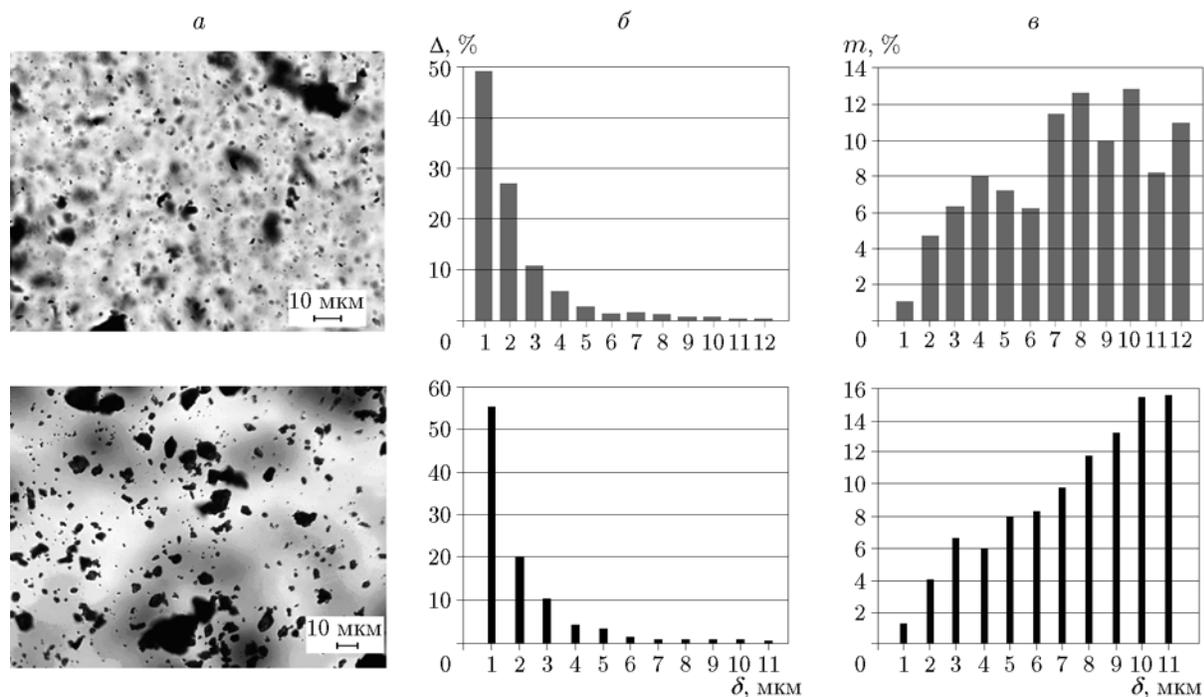


Рис. 2. Фотографии помолов антрацита и бурого угля, сделанные через микроскоп (а), и их распределение по размерам (б) и массе (в)

типа в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. Фотографии частиц угля, выполненные с помощью микроскопа, приведены на рис. 2, а, а их распределение по размерам Δ и массе m , полученное с помощью компьютера по специальной программе, — соответственно на рис. 2, б и 2, в. Частицы имеют угловатую произвольную форму. Размеры отдельных частиц не превышают $\delta \approx 12$ мкм. Присутствует много конгломератов частиц, отличающихся острыми выступами и глубокими впадинами, не свойственными целым частицам.

При построении распределения частиц по массе считалось, что масса частицы пропорциональна кубу ее характерного размера. Наибольшее количество частиц имеет размер около 1 мкм, однако массовая доля распределена в об-

ратном порядке — основную массу составляют частицы крупного размера.

При отсутствии сертификата для конкретной массы угля (40 кг) проводили структурный анализ помола. Согласно ГОСТ 9080 приготавливали аналитическую пробу помола, которая по стандартным методикам расходовалась на определение насыпной плотности угля ρ_C , его влажности W^{ru} (ГОСТ 6963), зольности A^d (ГОСТ 6383) и выхода летучих веществ V^{daf} (ГОСТ 6382). Результаты анализа приведены в табл. 2, которая включает в себя данные и для каменного длиннопламенного угля, использованного нами ранее [4–7]. Видно, что горючим является около 80 % исходного угля ($G'_C \approx 0.8G_C$).

Таблица 2

Состав углей

Уголь	ρ_{CO} , г/см ³	ρ_C , г/см ³	δ , мкм	W^{ru} , %	A^d , %	V^{daf} , %
Каменный	1.26	0.53	1 ÷ 7	5.065	14.18	24.68
Антрацит	2.25	0.45	1 ÷ 12	2	17.4	5.3
Бурый	1.33	0.4 ÷ 0.48	1 ÷ 12	15	6.21	51.7

Примечания. ρ_{CO} — плотность массива угля, ρ_C — насыпная плотность угля.

В расходомер 7 загружали 300 ÷ 350 г угля. Во время подачи в камеру ($t = 0.1 \div 0.6$ с) его расход, определяемый по перемещению поршня расходомера L_p [5], составлял $G_C = 0.1 \div 3$ кг/с. Коэффициент избытка угля $\phi_C = G'_C/G_{C,st}$, где $G_{C,st}$ — расход угля, соответствующий стехиометрическому соотношению с воздухом, выбирался из предположения чисто углеродного состава угля. При полном окислении углерода С до CO_2 стехиометрия ($\phi_C = 1$) достигается при стехиометрическом коэффициенте $\chi_0 = G_a/G_{C,st} = 11.54$. Это соотношение приемлемо для антрацита, состоящего практически из углерода, не считая инертных добавок (см. табл. 2). Однако для бурого угля, содержащего значительное количество летучих, главным образом метана, это соотношение, на самом деле, будет больше. Каким оно будет — нельзя сказать без детального исследования химического состава данного бурого угля. Рассчитанные из этих предположений коэффициенты избытка угля изменялись в пределах $\phi_C = 0.13 \div 5.26$, а суммарный коэффициент избытка двухфазного горючего — $\phi_\Sigma = \phi_C + \phi_f = 0.5 \div 5.8$. Удельные расходы гетерогенной топливоздушной смеси $g_\Sigma = (G_a + G_C + G_f)/S_c$ через поперечное сечение камеры S_c в разных опытах варьировались.

Образующуюся двухфазную смесь воспламеняли разрядом конденсатора на алюминиевую полосу фольги. Энергия разряда составляла ≈ 5 Дж. Электрод для иницирования располагался на расстоянии 40 мм от цилиндрической поверхности камеры сгорания. Продукты сгорания вытекали в атмосферу.

Оптическая регистрация процессов проводилась через два радиальных окна шириной 20 мм и длиной 150 мм, расположенных симметрично относительно центра (см. поз. 16 на рис. 1) с помощью фоторегистратора с падающим барабаном [5] (при добавке — водород) или высокоскоростной каме-

ры Photron Fastcam SA1.1 675K-M3 в режиме 400 000 кадр/с (при добавке — синтез-газ). В последнем случае по специальной программе, написанной на языке C++, из каждого кадра, состоящего из 16 пикселей по ширине окна, выбирался только один пиксель, который затем соединялся с единичными пикселями других кадров. В результате конструировалось течение в системе волны.

Давления в ресиверах и коллекторах воздуха и горючего ($p_{r,a}$ и $p_{r,f}$, $p_{m,a}$ и $p_{m,f}$ соответственно), а также в камере (p_{ci} , где i — номер датчика на расстоянии от цилиндрической поверхности 5, 47, 87, 126, 163 и 189 мм) регистрировались датчиками давления фирмы WIKA (Германия). Сигналы датчиков давления и герконов записывали и обрабатывали компьютерной системой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Антрацит и бурый уголь занимают крайние позиции по содержанию чистого углерода и летучих (см. табл. 2), а также по калорийности по сравнению с другими ископаемыми углями, например каменным длиннопламенным. Поэтому ожидалось различие детонационных свойств исследуемых двухфазных смесей с воздухом. Особенности смесеобразования двухфазной угольно-воздушной смеси таковы, что дисперсность частиц известна заранее. Необходимо лишь обеспечить их равномерное распределение в потоке воздуха в области распространения фронта детонационной волны. Вихревая структура течения в радиальной вихревой камере позволяет выполнить это требование [9, 10].

НСД антрацита. Горючая добавка — водород

Использовались камеры сгорания с выходным отверстием $d_{c2} = 250, 175$ и 125 мм. Для

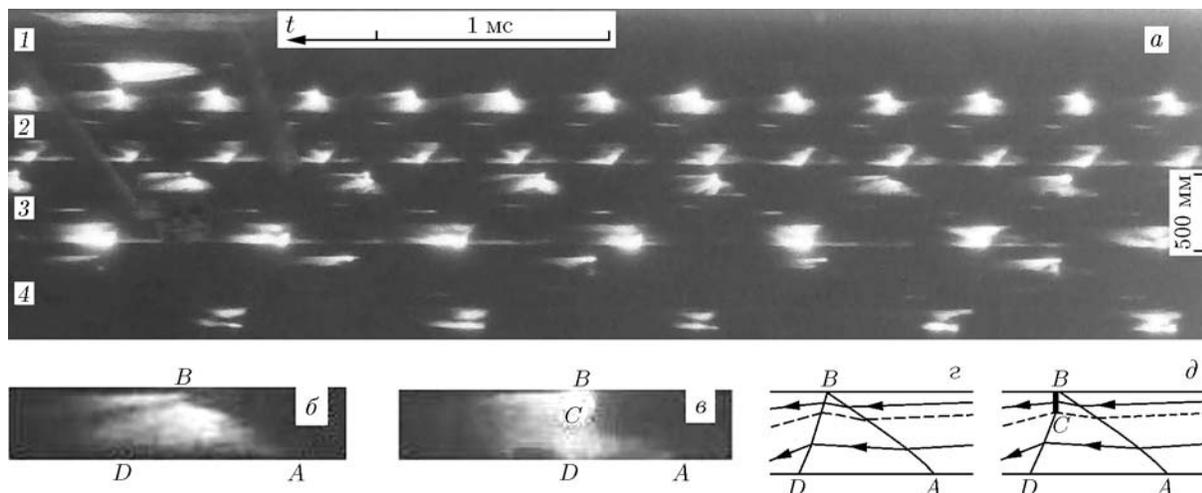


Рис. 3. Типичная фоторегистрограмма НСД в смеси антрацит — воздух с добавкой водорода (фрагменты) в камере с $d_{c2} = 250$ мм: 1/6 часть фоторегистрограммы (а), отдельные ПДВ (б, в), схемы течения в окрестности ПДВ (г, д)

Таблица 3

Параметры НСД смеси антрацит — воздух с добавкой водорода

t , мс	G_a , кг/с	G'_C , кг/с	G_f , кг/с	g_Σ , кг/(с·м ²)	ϕ_C	ϕ_f	ϕ_Σ	G_f/G_C , %	D , км/с	n
0	11.04	1.37	0.14	533	1.41	0.43	1.84	8.1	—	—
33.3	10	1.2	0.125	481	1.37	0.43	1.8	8.3	1.9	2
66.6	9.08	2.16	0.114	482	3.4	0.43	3.83	4.2	2.07	1
99.9	8.26	1.6	0.103	423	2.76	0.432	3.19	5.2	1.54	1

камеры с $d_{c2} = 250$ мм фрагмент типичной фоторегистрограммы приведен на рис. 3,а, он включает в себя четыре дорожки длительностью около 5 мс каждая, отстоящих друг от друга по времени на 33.3 мс.

Каждая дорожка состоит из двух разверток, снятых из двух окон (см. рис. 1, поз. 1б) методом компенсации скорости [5]: пленка двигалась перпендикулярно длинной стороне окна со скоростью, близкой к скорости изображения. При этом на одной развертке каждой из дорожек скорости пленки и изображения совпадали по направлению и достигалась частичная компенсация (здесь — верхние развертки), а на другой — в противоположных направлениях и получалась полная раскомпенсация скорости изображения (нижние развертки). На 1-й дорожке зафиксирован момент инициирования детонации (яркая вспышка на верхней и нижней развертках). Устойчивые ПДВ сформировались примерно через 3 мс после инициирования. Сначала наблюдалась конкуренция меж-

ду двумя и тремя ПДВ, затем установились две ПДВ ($n = 2$), движущиеся со скоростью $D = 1.9$ км/с относительно наружного диаметра камеры (2-я дорожка). С уменьшением доли подмешиваемого к углю водорода осуществлялся переход к режиму с одной ПДВ. На фрагменте рис. 3,а этот детонационный режим зафиксирован на 3-й и 4-й дорожках со скоростями ПДВ $D = 2.07$ и 1.54 км/с соответственно. Минимальное количество водорода, необходимое для осуществления НСД, составило 4.2 % расхода угля при $g_\Sigma = 482$ кг/(с·м²). Параметры детонационного режима для ряда моментов времени t , отсчитываемого от момента его инициирования, приведены в табл. 3, а осциллограммы НСД, фрагменты фоторегистрограмм которой изображены на рис. 3,а–в, — на рис. 4.

Отметим, что ПДВ реализованы при большом коэффициенте избытка двухфазного горючего ($\phi_\Sigma > 1.8$). Это значит, что в детонационной волне при полном выгорании водорода сгорали мелкие частицы угля, а крупные выхо-

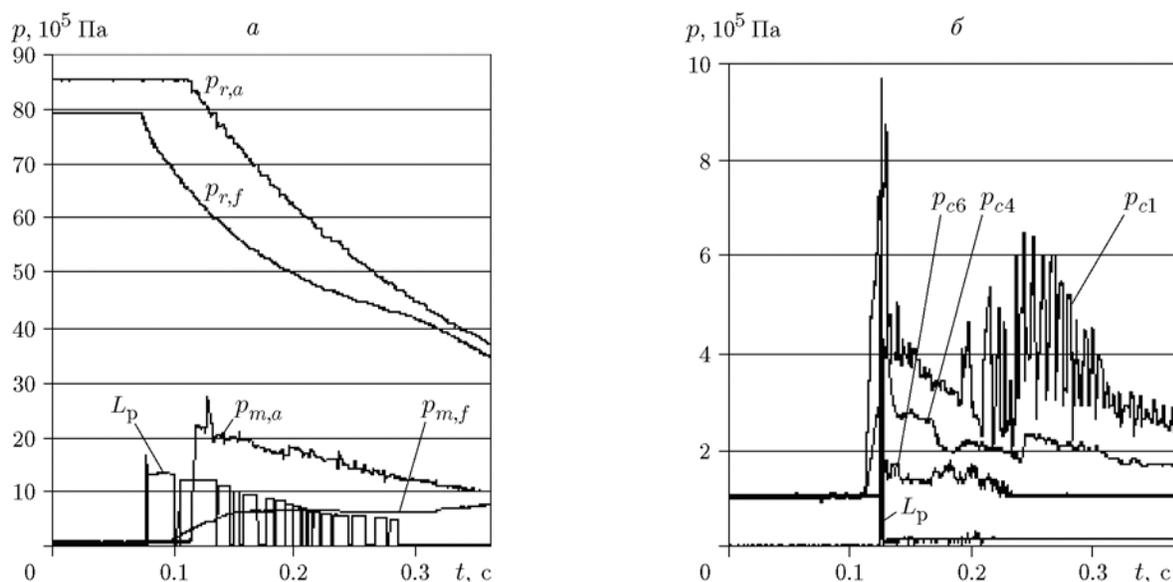


Рис. 4. Осциллограммы процесса в системе подачи (а) и в камере сгорания (б) для смеси антрацит — воздух с добавкой водорода

дили за ее пределы. В ряде режимов скорость ПДВ относительно цилиндрической стенки камеры даже больше скорости идеальной детонации Чепмена — Жуге в стехиометрической угольно-воздушной смеси, которая по расчетам составляет $D_{CJ} = 1.715$ км/с [11]. По-видимому, около цилиндрической стенки детонационная волна пересжата, а относительно окружности камеры, проходящей через середину фронта ПДВ, распространяется с меньшей скоростью, близкой к скорости детонации Чепмена — Жуге данного состава смеси. Необходимо также учитывать и тангенциальную скорость воздуха, которая вблизи цилиндрической стенки равна ≈ 200 м/с [4–7], а ПДВ, как правило, имеет одинаковое с ней направление.

Начало НСД на осциллограммах рис. 4, б отмечено резким подъемом давления в камере в момент инициирования, а конец — полным вытеснением двухфазной горючей смеси из расходомера (последний сигнал L_p на осциллограмме рис. 4, а). При реализации одной ПДВ через $t \approx 70$ мс после инициирования на периферии камеры среднее давление возрастает (датчик давления p_{c1}) и развиваются колебания высокой амплитуды с частотой $6 \div 7$ кГц, которые не коррелируют с частотой вращения детонационной волны (≈ 1 кГц). Природа этих колебаний пока не выяснена. На осциллограммах рис. 4, а видно, что давление в ресивере воздуха намного больше давления в камере (см.

рис. 4, б). Это вызвано необходимостью обеспечения больших расходов воздуха через трубопровод и клапан с недостаточной площадью проходного сечения. Отношение давления на завихряющих каналах воздуха $p_{m,a}$ к давлению в камере p_{c1} равно $p_{m,a}/p_{c1} \approx 4$. При уменьшении выходного сечения камеры сгорания до $d_{c2} = 175$ мм давление в камере увеличивалось так, что отношение давлений уменьшалось до $p_{m,a}/p_{c1} = 2.13$. То есть уменьшением выходного сечения d_{c2} в камере можно повышать давление в радиальной камере сгорания.

НСД бурого угля. Горючая добавка — водород

Впервые реализована и исследована НСД смеси частиц бурого угля с воздухом и добавкой водорода в вихревой радиальной камере с постоянной площадью сечения вдоль радиуса проточного типа диаметром 500 мм. Отличительным свойством бурого угля от других углей является высокое содержание летучих (см. табл. 2).

Расходы компонентов двухфазной смеси, при которых существовала НСД, изменялись в пределах: воздуха — $G_a = 9.61 \div 6$ кг/с, угля — $G_C = 3 \div 0.8$ кг/с, водорода — $G_f = 0.12 \div 0.08$ кг/с. При этом обеспечивался коэффициент избытка горючего по углю $\phi_C = 2.6 \div 0.85$, а его массовое отношение к расходу угля — $G_f/G_C = 14 \div 3.96$ %. Скорости

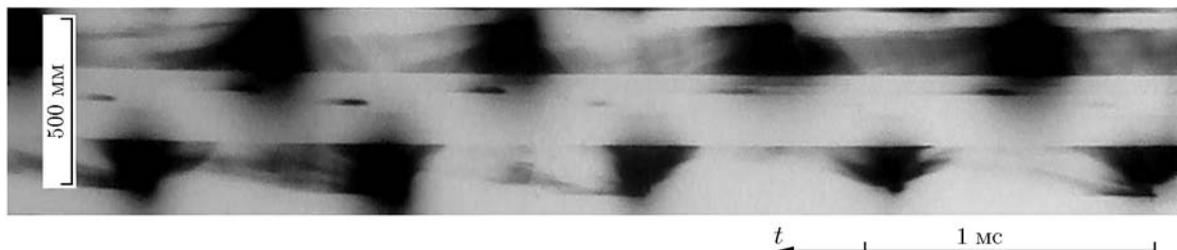


Рис. 5. Фоторегистрограмма НСД в двухфазной смеси бурый уголь — воздух с добавкой водорода (фрагмент, негатив):

$d_{c2} = 125$ мм, $G = 9.61$ кг/с, $G_C = 2.64$ кг/с, $\phi_C = 2.56$, $G_f = 0.104$ кг/с, $p_{m,a} = 25 \cdot 10^5$ Па, $p_{c1} = 17 \cdot 10^5$ Па ($p_{m,a}/p_{c1} = 1.47$), $D = 1.78$ км/с, $n = 1$

Таблица 4

Основные параметры режимов НСД антрацита и бурого угля при минимальных добавках синтез-газа

Уголь	Синтез-газ	G_a , кг/с	G_f , кг/с	G_C , кг/с	G_f/G_C	g_{Σ} , кг/(с·м ²)	ϕ_{Σ}	$p_{m,a}$, 10 ⁵ Па	p_{c1} , 10 ⁵ Па	D , км/с	n
Антрацит	CO + H ₂	2.69	0.33	1.52	0.27	192	5.8	6.75	1.85	1.51	1
	CO + 2H ₂	2.14	0.2	1.22	0.21	159	5.0	5.84	1.45	1.55	1
	CO + 3H ₂	4.0	0.14	1.02	0.14	219	2.55	7.8	2.1	1.48	3
Бурый	CO + H ₂	5.79	0.54	1.86	0.29	335	1.58	13	3.4	1.81	1
	CO + 2H ₂	5.36	0.35	1.73	0.2	316	3.4	12	4.3	1.51	1
	CO + 3H ₂	5.84	0.26	2.42	0.11	350	4.01	13.7	3.7	1.71	1

НСД относительно наружного диаметра камеры менялись от $D = 1.78$ ($n = 1$) до 1.59 км/с ($n = 4$). Большое количество волн соответствовало большему содержанию водорода в двухфазной горючей смеси. Характерная фоторегистрограмма НСД смеси бурый уголь/воздух + H₂ при минимальном количестве подмешиваемого водорода ($G_f/G_C = 3.96$ %) представлена на рис. 5.

Структура волн и течения в их окрестности не отличается от приведенных на рис. 3 для смеси антрацит — воздух с добавкой водорода 4.2 %. Она также близка к наблюдаемой ранее для каменного длиннопламенного и древесного углей [4–8]. Однако для древесного угля, вследствие высокой пористости, минимальная добавка водорода составляла 2.8 %. Скорость непрерывной детонации бурого угля с воздухом при одинаковых расходах угля, воздуха и водорода меньше, чем для антрацита. По-видимому, это связано с более низкой теплотворной способностью бурого угля. Диаметр выходного отверстия камеры в данном эксперименте составлял $d_{c2} = 125$ мм, поэтому истечение воздуха было докритическим при $G_f/G_C = 3.96$ % —

$p_{m,a}/p_{c1} = 1.47$, а при $G_f/G_C = 5.4$ % к концу процесса отношение давлений уменьшилось до $p_{m,a}/p_{c1} = 1.35$. Для выходных отверстий $d_{c2} = 175$ и 250 мм наблюдали сверхкритический режим истечения при $p_{m,a}/p_{c1} = 2.13$ и 2.94 соответственно.

Горючая добавка — синтез-газ

Впервые реализована и исследована НСД смеси частиц антрацита и бурого угля с воздухом и добавкой синтез-газа составов CO/H₂ = 1/1, 1/2 и 1/3. Выходное отверстие в камере во всех опытах составляло $d_{c2} = 250$ мм. Основные параметры режимов, при которых реализована НСД при минимальных расходах синтез-газа, приведены в табл. 4.

На рис. 6 представлены фрагменты фоторегистрограмм НСД смесей антрацита и бурого угля при добавке минимального количества синтез-газа состава CO + 2H₂, при котором существует непрерывная детонация.

Фоторегистрограммы получены путем обработки по программе C⁺⁺ кадров, снятых видеокамерой. В камере сгорания вращается одна ПДВ, которую видеокамера зафиксировала

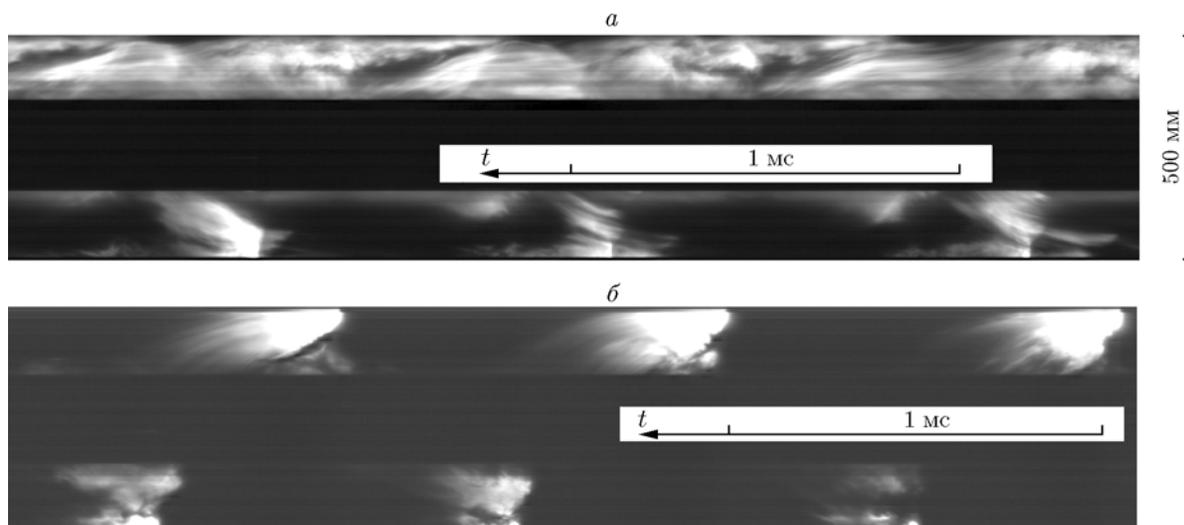


Рис. 6. Фоторегистрограммы НСД смеси антрацита (а) и бурого угля (б) с воздухом при добавке синтез-газа состава $\text{CO} + 2\text{H}_2$ (данные по режимам приведены в табл. 4)

на трех оборотах при ее прохождении напротив окна. Чтобы скорректировать снимки с соблюдением линейных масштабов по диаметру $d_{c1} = 500$ мм и окружности $\pi d_{c1} = 1570$ мм, необходимо их растянуть по оси времени в 3.14 раза, так как по окружности камеры располагается одна ПДВ. Однако светящиеся объекты, движущиеся в тангенциальном направлении: ПДВ, ударные волны, а также траектории продуктов реакции, зафиксированы с искажением.

Во-первых, за время экспозиции движущегося объекта происходит размазывание (искажение) его изображения на светочувствительной плате, степень которого зависит от того, в какую сторону и с какой скоростью движется объект. Скорость сканирования вдоль рамки, имеющей на экране компьютера ширину 4 мм за время экспозиции 2.5 мкс, составляет $4 \cdot 10^{-3} / 2.5 \cdot 10^{-6} = 1.6 \cdot 10^3$ м/с. Рамка занимала всю ширину окна, поэтому коэффициент уменьшения изображения устанавливался $k_i = 20/4 = 5$. ПДВ, вращающиеся со скоростью $D \approx 1.5 \cdot 10^3$ м/с относительно цилиндрической поверхности камеры, двигались вдоль окна на экране со скоростью 300 м/с. При приближении к оси камеры скорость объектов линейно уменьшалась. Если направления сканирования и движения изображения объекта совпадали, картина течения приближалась к реальной, если не совпадали — искажение усиливалось. Исходя из этого можно утверждать, что при установке видеокamеры на расстояние,

обеспечивающее значение $k_i = 1$, объект, движущийся со скоростью $1.6 \cdot 10^3$ м/с в направлении сканирования, может быть сфотографирован без искажения (как у движущейся пленки при полной компенсации скорости изображения [2, 5, 12]). Однако при заданной частоте кадров пропорционально уменьшится длина, охватываемая рамкой окна, поэтому невозможно будет зафиксировать всё поле течения вдоль окон камеры сгорания. Уменьшению искажения изображения способствует и увеличение скорости съемки, но этого не позволяют сделать возможности видеокamеры и недостаточная интенсивность свечения процесса. Поскольку ПДВ двигались в окнах камеры в разных направлениях, искажение в одном из них было частично скомпенсировано, а в другом еще более искажено. Поэтому ПДВ, зафиксированные через окна, имели заметные отличия. Особенно это касается антрацита (см. рис. 6, а). Во-вторых, развертка линейна, а ПДВ вращаются по окружности, поэтому для реального представления волн и течения в их окрестности необходимо свернуть линейные развертки в кольцо [4, 5].

Изменение давлений в системе подачи принципиально не отличается от приведенных на рис. 4, а. Существенно отличается ход поршня L_p (расход угля G_C) для антрацита и бурого угля. Антрацит в среде синтез-газа проявляет неравномерную и пониженную текучесть (продавливается через форсунки более длительное время). В связи с этим труднее наблюдать и

анализировать влияние расхода антрацита на параметры НСД. Наоборот, бурый уголь очень текучий, быстрее и равномернее по времени выдавливается из форсунок. В случае использования водорода заметного различия в подаче антрацита и бурого угля не наблюдалось — ход поршня был примерно одинаков (см. рис. 4, *a*). В камере сгорания и в коллекторе воздуха не замечено высоких колебаний давления при одноволновом режиме, которые наблюдались для водорода (см. рис. 4, *b*). Режим истечения газугольной смеси через отверстия форсунок имеет свои особенности, отмечавшиеся ранее в [4, 5], и требует специального изучения.

Из табл. 4 видно, что нижний предел существования НСД антрацита и бурого угля по количеству подмешиваемого синтез-газа увеличивается с уменьшением содержания доли водорода в синтез-газе. Для антрацита достигнуты минимальные значения $G_f/G_C = 0.14, 0.21$ и 0.27 , для бурого угля — $0.11, 0.2$ и 0.29 при $CO/H_2 = 1/3, 1/2$ и $1/1$ соответственно. То есть для каждого из исследованных составов синтез-газа доли их минимальных добавок в антрацит и бурый уголь близки. При более низких значениях G_f/G_C непрерывная детонация в радиальной камере прекращалась и догорание горючего происходило за пределами камеры. Отметим, что предельные значения отношения G_f/G_C наблюдали при больших расходах угля и коэффициентах избытка двухфазного горючего ϕ_Σ , т. е. при большом недогорании угля. Несомненно, эти значения не абсолютны, получены для данной системы подачи, данного давления и геометрии камеры сгорания, способа подмешивания горючего газа, дисперсности угля, а также при повышенных коэффициентах избытка горючего, которые могут быть одной из причин прекращения НСД. Поэтому их можно считать первым приближением на пути к достижению минимальных добавок в оптимальных режимах детонационного сжигания угля.

С увеличением добавок как водорода, так и синтез-газа любого состава от их нижних предельных значений растет количество ПДВ и становится более регулярной их структура. Например, при добавке к антрациту 8.3 % водорода реализуется двухволновый режим со скоростью ПДВ $D = 1.92$ км/с при $\phi_\Sigma = 1.8$ (см. рис. 3, *a*, 2-я дорожка). Для исследованных двухфазных топливовоздушных смесей, как и в [5], наблюдались повышенные давления у ци-

линдрической поверхности радиальной камеры при холостых запусках по сравнению с НСД при тех же удельных расходах g_Σ .

Следует отметить, что применение синтез-газа вместо водорода в качестве добавки гораздо продуктивнее с практической точки зрения. Использование водорода сопряжено с повышенной опасностью, а также с высокой стоимостью. Производство синтез-газа достаточно хорошо налажено и не представляет повышенной опасности, имеет более низкую себестоимость. Газогенератор может быть расположен непосредственно вблизи угольного склада. Не исключено использование синтез-газа, полученного в результате подземной газификации углей [13, 14].

НСД интенсивно и с большей полнотой позволяет сжигать топливо в камерах малых габаритов, определяемых размером фронта детонационной волны. Полученные экспериментальные данные по детонационному сжиганию углей могут найти применение в энергетике, химической промышленности и на транспорте. Оттеснение несгоревших и твердых минеральных частиц в пограничные слои у стенок камеры [9, 10], где можно эффективно проводить их отбор, будет способствовать снижению загрязнения окружающей среды вредными продуктами.

ВЫВОДЫ

Впервые в вихревой радиальной камере диаметром 500 мм с постоянной (вдоль радиуса) площадью сечения реализована непрерывная спиновая детонация смесей дисперсных частиц антрацита и бурого угля с воздухом при добавке водорода или синтез-газа составов $CO/H_2 = 1/1, 1/2$ и $1/3$. Минимальное количество водорода, необходимого для осуществления непрерывной спиновой детонации, составило около 4 % расхода угля. Количество подмешиваемого к углю синтез-газа возрастает с уменьшением в нем доли водорода — 14, 21 и 27 % для антрацита и 11, 20 и 29 % для бурого угля при $CO/H_2 = 1/3, 1/2$ и $1/1$ соответственно. Исследованная структура детонационных волн и течения в их окрестности при непрерывной спиновой детонации двухфазных смесей с воздухом всех видов ископаемых углей, как с преимущественным содержанием чистого углерода (антрацит), так и с большим содержанием летучих (бурый уголь), принципиально не отличалась от наблюдаемых ранее

при детонационном сжигании длиннопламенного угля (промежуточное содержание чистого углерода и летучих). Более высокие скорости детонации зафиксированы для более энергоемких углей (антрацита). Древесный уголь (почти чистый углерод) находится на особом положении: из-за высокой пористости он требует меньших габаритов камеры сгорания и добавок водорода для реализации непрерывной спиновой детонации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канторович Б. В., Миткалинный В. И., Делягин Г. Н., Иванов В. М. Гидродинамика и теория горения потока топлива. — М.: Металлургия, 1971.
2. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 129, № 6. — С. 1254–1256.
3. 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.
4. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А. Детонация угольно-воздушной смеси с добавкой водорода в вихревых плоскорадиальных камерах // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 109–118.
5. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
6. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А. Детонационное сжигание каменного угля // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 2. — С. 89–94.
7. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А. Непрерывная спиновая детонация угольно-воздушной смеси в плоскорадиальной камере проточного типа // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 93–99.
8. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная спиновая детонация смесей синтез-газ — воздух // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 4. — С. 60–67.
9. 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.
10. Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф. Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 2. Вихревая структура течения // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 1. — С. 41–49.
11. Васильев В. М., Вольперт А. И., Клычников Л. В., Петров Ю. М., Салакатова Л. С., Стесик Л. Н. Расчет параметров детонации смесей горючих веществ с воздухом // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 3. — С. 127–134.
12. Ракинова Х. А., Трошин Я. К., Щелкин К. И. Спин у пределов детонации // ЖЭТФ. — 1947. — Т. 17, № 12. — С. 1409–1410.
13. Менделеев Д. И. Будущая сила, покоящаяся на берегах Дона // Собр. соч. — Л.; М., 1949. — Т. 11. — С. 66.
14. Крейнин Е. В., Федоров Н. А., Звягинцев К. Н. Подземная газификация угольных пластов. — М.: Недра, 1982.

Поступила в редакцию 14/XI 2015 г.