

УДК 534.2,546.2

## ДЕТОНАЦИОННОЕ СЖИГАНИЕ В ВОЗДУХЕ БУРОГО УГЛЯ С ДОБАВКАМИ ДИОКСИДА ТИТАНА И ВОДЫ

Ф. А. Быковский<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

В радиальной вихревой камере диаметром 500 мм исследовано влияние минеральной добавки (6.2 ÷ 70 %) и добавки воды (15 ÷ 54 %) в бурый уголь на возможность его сжигания в потоке воздуха в непрерывном детонационном режиме. В качестве транспортного средства для угля и промотора химической реакции использовался синтез-газ состава CO + 3H<sub>2</sub>. Показано, что в зависимости от количества добавляемого в уголь минерала (TiO<sub>2</sub>), воды и синтез-газа могут реализовываться режимы непрерывной спиновой детонации, горения и пульсирующего горения. Определены границы между областью существования детонации и горения в координатах «отношение расходов синтез-газ / горючая часть угля — минеральная составляющая угля и воды». При содержании в смеси с бурым углем минеральной добавки до 65 % и воды менее 30 % поддерживается режим непрерывной спиновой детонации. При этом показано, что с увеличением минеральной добавки и повышением влажности угля необходимо повышать расходы синтез-газа для сжигания его горючей составляющей.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, пульсирующая детонация, радиальная вихревая камера сгорания, бурый уголь, шлам, синтез-газ.

DOI 10.15372/FGV20170409

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует проблема сжигания низкосортных углей (шламов), содержащих большое количество минеральных примесей (до 40 %) и влаги (до 30 %) [1]. Из-за отсутствия сбыта шлам накапливается в отстойниках и отвалах обогатительных фабрик, занимая значительные земельные участки и вызывая экологические проблемы. Высокие зольность и влажность шлама, а также малые размеры частиц (до 1 мм) затрудняют его использование в качестве топлива в котлах, оборудованных чугунными колосниковыми решетками для сжигания топлива в неподвижном слое. Поэтому находят другие способы сжигания, например в котлах с топками полукипящего слоя, которые могут быть экономически даже более эффективными, чем котлы с чугунной колосниковой решеткой, при сжигании сортовых каменных углей [1, 2]. В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева разрабатываются принципиально новые детонационные способы

сжигания топлива, в том числе и угля [3–7].

Цель настоящей работы — в радиальной вихревой камере диаметром 500 мм исследовать возможность детонационного сжигания бурого угля в потоке воздуха при подмешивании к нему твердых минеральных добавок и воды для моделирования низкосортных углей и шлама. Использовался помол бурого угля Канско-Ачинского месторождения, а в качестве твердой добавки — диоксид титана TiO<sub>2</sub>. Смесь транспортировалась в камеру сгорания в потоке синтез-газа состава CO + 3H<sub>2</sub>, который служил также промотором детонационного горения.

### 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема установки и вихревой радиальной камеры диаметром  $d_{c1} = 500$  мм с истечением к центру подробно описана в [6]. Отличие используемой в данной работе камеры заключалось в том, что воздух предварительно закручивался в коллекторе и подавался в камеру сгорания через щель шириной  $\delta = 5$  мм. Площадь проходного сечения щели воздуха на входе в камеру равна  $S_\delta = \pi d_{c1} \delta = 78.5$  см<sup>2</sup>, а коэффициент расширения площади камеры сгорания —  $K_S = S_c / S_\delta \approx 3$  (здесь  $S_c = \pi d_{c1} \Delta =$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00080).

© Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А., 2017.

235.6 см<sup>2</sup> — площадь сечения камеры, Δ = 15 мм — расстояние между стенками у цилиндрической поверхности камеры). Двухфазную смесь угля и диоксида титана или трехфазную смесь с добавкой воды к углю с синтез-газом подавали в камеру сгорания через радиальные отверстия [6].

Воздух в камеру поступал из двух ресиверов, каждый объемом  $V_{r,a} = 88.5$  л, при начальном давлении  $p_{r,a0} = 20 \pm 1 \cdot 10^5$  Па, а частицы бурого угля — из расходомера поршневой системы. Начальное давление на поршень  $p_{r,f0} = 60 \pm 1 \cdot 10^5$  Па осуществлялось синтез-газом состава  $CO + 3H_2$ , поступающим из ресивера объемом  $V_{r,f} = 14$  л, где проводилось его приготовление. Этот же синтез-газ подмешивали к увлажненному углю или углю с твердыми инертными добавками  $TiO_2$ . Выбор оксида титана обусловлен тем, что частицы порошка имели размеры, близкие к размерам угольных частиц, и плотность (4.26 г/см<sup>3</sup>), близкую к средней плотности основных зольных включений [8]:  $SiO_2$  (2.65 г/см<sup>3</sup>),  $Al_2O_3$  (3.97 г/см<sup>3</sup>) и  $Fe_2O_3$  (5.25 г/см<sup>3</sup>). Следует отметить, что соотношение этих оксидов сильно зависит от месторождения угля.

Помол бурого угля производили на дисковой мельнице дезинтеграторного типа в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. Фотографии частиц угля, выполненные с помощью микроскопа, и их распределение по размерам и массе приведены в работе [6]. Наибольшее количество частиц имеет размер около 1 мкм, однако массовая доля распределена в обратном порядке — основную массу составляют частицы более крупных размеров (5 ÷ 12 мкм).

Частицы диоксида титана практически монодисперсные, размером около 10 мкм, с округлыми формами (рис. 1).

Физические характеристики помола бурого угля и его смесей с диоксидом титана сведены в табл. 1. В первой строке содержатся данные по исходному состоянию угля (без добавки  $TiO_2$ ). В последующих строках в величину зольности  $A^d$  входят также изначальные твердые минеральные включения в бурый уголь. Плотность диоксида титана почти в три раза больше, чем массива бурого угля: 4.26 и 1.33 г/см<sup>3</sup> соответственно. Поэтому насыпная плотность смеси повышалась при увеличении добавки. При этом уменьшалось содержание летучих и чистого углерода, являющихся горючей частью угля ( $V^{daf} + C_C = C'_C$ ). Соот-

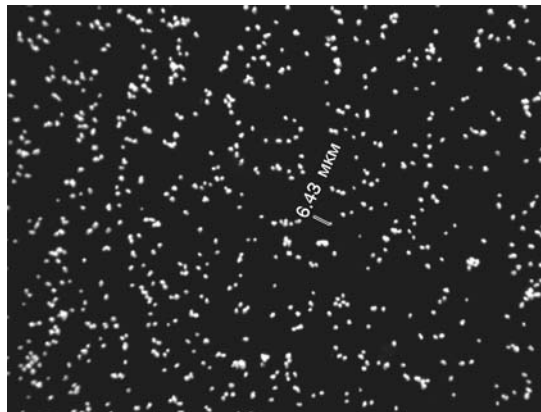


Рис. 1. Фотография частиц диоксида титана

Таблица 1  
Физический состав бурого угля с добавкой  $TiO_2$

$A^d$ , %	$\rho_C$ , г/см <sup>3</sup>	$W^{ru}$ , %	$V^{daf}$ , %	$C_C$ , %	$C'_C$ , %
6.2	0.45	15	51.7	27.1	78.8
20	0.59	12.8	44.1	23.1	67.2
30	0.65	11.2	38.6	20.2	58.8
40	0.74	9.6	33.1	17.3	50.4
50	0.81	8	27.6	14.4	42
65	0.95	5.6	19.3	10.1	29.4
70	1.0	4.8	16.5	8.7	25.2

Примечания.  $\rho_C$  — насыпная плотность угля,  $A^d$  — зольность,  $W^{ru}$  — влажность,  $V^{daf}$  — содержание летучих веществ,  $C_C$  — содержание углерода,  $C'_C$  — содержание горючей части угля; первая строка соответствует исходному составу бурого угля.

ветственно уменьшалась и калорийность полученной смеси.

Физические характеристики помола бурого угля с добавками воды приведены в табл. 2.

Расходы воздуха ( $G_a$ ) и синтез-газа ( $G_{sg}$ ) определяли по снижению давления в ресиверах, а расход всего угля ( $G_C$ ) — по ходу поршня расходомера [7]. Коэффициент избытка синтез-газа  $\phi_{sg} = G_{sg}/G_{sg,st}$ , угля —  $\phi_C = G'_C/G_{C,st}$ , где  $G_{sg,st}$  и  $G_{C,st}$  — расходы, соответствующие стехиометрическому соотношению с воздухом;  $\chi_{0sg} = G_a/G_{sg,st} = 8.075$  и  $\chi_{0C} = G_a/G_{C,st} = 11.54$  — стехиометрические коэффициенты. Для бурого угля, имеющего высокое содержание летучих, главным образом метана, значение  $\chi_{0C}$  на самом деле будет несколько больше.

Таблица 2

## Физический состав бурого угля с добавкой воды

$W^{ru}$ , %	$\rho_C$ , г/см <sup>3</sup>	$A^d$ , %	$V^{daf}$ , %	$C_C$ , %	$C'_C$ , %	Состояние
15	0.45	6.2	51.7	27.1	78.8	Сухой порошок
23.3	0.39	5.6	46.6	24.4	71	Слегка влажный
29.8	0.47	5.12	42.7	22.4	65.1	Вязкий и влажный
34	0.642	4.81	40.1	21	61.1	Густая влажная масса
54	1.15	3.36	28	14.7	42.7	Сметанообразная масса

Примечание. Здесь так же, как и в табл. 1, первая строка соответствует исходному составу бурого угля.

Таблица 3

## Параметры подачи воздуха, синтез-газа и угля в камеру сгорания

$G_a$ , кг/с	$G_{sg}$ , кг/с	$G_C$ , кг/с	$g_\Sigma$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	$\phi_{sg}$	$\phi_C$	$\phi_\Sigma$
11.6 ÷ 5.7	0.27 ÷ 0.18	0.27 ÷ 7.55	300 ÷ 700	0.19 ÷ 0.3	0.14 ÷ 2.62	0.48 ÷ 3

Примечания. Расходы:  $G_a$  — воздуха,  $G_{sg}$  — синтез-газа,  $G_C$  — угля; коэффициенты избытка:  $\phi_{sg}$  — синтез-газа,  $\phi_C$  — угля,  $\phi_\Sigma = \phi_{sg} + \phi_C$  — суммарный коэффициент избытка горючего;  $g_\Sigma = (G_a + G_C + G_{sg})/S_c$  — удельный расход гетерогенной топливовоздушной смеси через поперечное сечение камеры  $S_c$ .

Диапазоны расходов воздуха, синтез-газа и угля, а также коэффициенты избытка горючих составляющих угля приведены в табл. 3.

Образующуюся двухфазную смесь воспламеняли разрядом конденсатора на алюминиевую полосу фольги с энергией разряда около 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 камеры сгорания [6], высокоскоростной камерой Photron Fastcam SA5 type 775K-M2, работающей со скоростью 420 000 кадр/с. По специальной программе, написанной на языке C++, из каждого кадра, состоящего из 16 пикселей по ширине окна, выбирался только один, который затем соединялся с единичными пикселями других кадров. В результате конструировалось течение в системе волны. Следует иметь в виду, что для реального отображения структуры поперечных детонационных волн (ПДВ) необходимо свернуть линейную развертку в кольцо с соблюдением масштаба исследуемого объекта.

Давление в ресиверах и коллекторах воздуха и горючего ( $p_{r,a}$  и  $p_{r,sg}$ ,  $p_{m,a}$  и  $p_{m,sg}$  соответственно), а также в камере ( $p_{ci}$ , где  $i$  — но-

мер датчиков, находящихся от цилиндрической поверхности на расстоянии 5, 47, 87, 126 мм) регистрировалось датчиками давления фирмы WIKA (Германия). Сигналы датчиков давления и расходомера записывали и обрабатывали компьютерной системой.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 2.1. Добавка к бурому углю диоксида титана

При добавке в помол бурого угля частиц диоксида титана были реализованы режимы непрерывной спиновой детонации (НСД), обычного горения и пульсирующего горения, которые наблюдали, как правило, в течение одного эксперимента.

Фрагменты типичных фоторегистрограмм при 40 % твердых инертных примесей в угле приведены на рис. 2. Четыре ( $n = 4$ ) детонационные волны со скоростью относительно цилиндрической поверхности  $D = 1.63$  км/с сформировались через 3.5 мс после иницирования. На рис. 2,а приведен фрагмент НСД по истечении 40 мс после иницирования. Направление движения ПДВ с фронтом  $BC$  на развертке — слева направо по направлению закрутки воздуха. Однако в действительности ПДВ напротив одного из окон движутся в обратном направлении (на

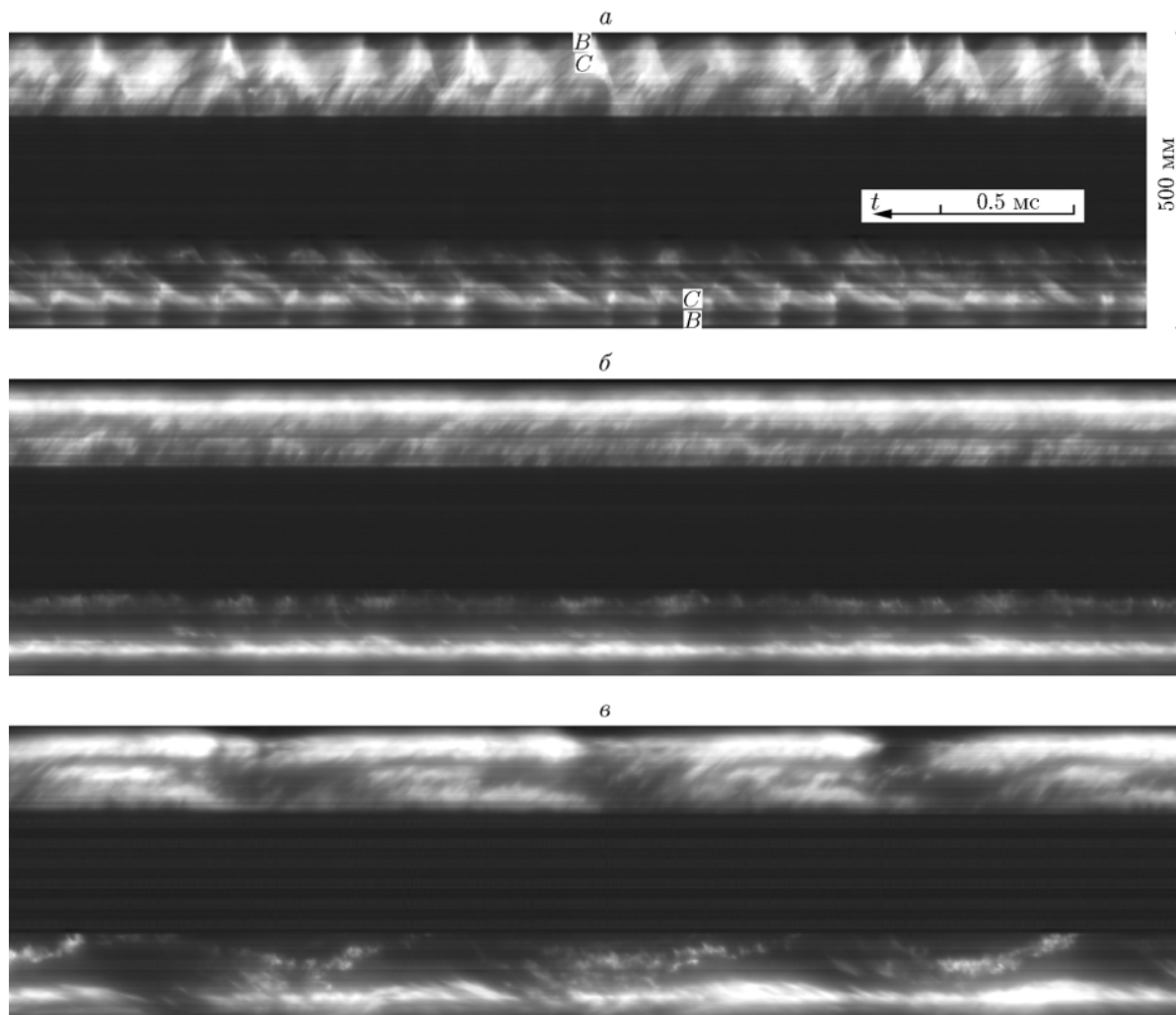


Рис. 2. Фоторегистрограммы (фрагменты) режимов с ПДВ (а), горения (б) и пульсирующего горения (в) угля с 40 % твердых инертных примесей:

а —  $g_{\Sigma} = 583 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ,  $\phi_{\Sigma} = 1.97$ ,  $G_{sg}/G'_C = 0.19$ ,  $p_{c1} = 4.2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $D = 1.62 \text{ км}/\text{с}$ ,  $n = 4$  ( $f = 4.27 \text{ кГц}$ );  
 б —  $g_{\Sigma} = 544 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ,  $\phi_{\Sigma} = 2.74$ ,  $G_{sg}/G'_C = 0.144$ ,  $p_{c1} = 3.5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  
 в —  $g_{\Sigma} = 469 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ,  $\phi_{\Sigma} = 2.36$ ,  $G_{sg}/G'_C = 0.18$ ,  $p_{c1} = 3.07 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $f = 0.81 \text{ кГц}$

приведенном фрагменте — в верхнем окне). Таковы особенности конструирования течения по кадрам видеокамеры — не регистрируется направление движения волн. Его можно определить косвенно по частичной компенсации фотокамерой скорости движения объекта или при последовательном просмотре кадров в режиме «кино».

Поскольку в камере сгорания расположено четыре ПДВ, то одна и та же волна появляется в противоположном окне через два периода между волнами. Затем НСД переходит в горение с ярко выраженным фронтом на расстоянии примерно 15 мм от цилиндрической

поверхности (ярко светящаяся дорожка на фоторегистрограмме рис. 2,б). Затем через 95 мс после инициирования режим горения становится пульсирующим. Пучности свечения (яркие периодические вспышки у цилиндрической поверхности камеры) появляются в окнах примерно в одно и то же время с частотой  $f \approx 0.8 \text{ кГц}$  (рис. 2,в).

Осциллограммы рассмотренного режима приведены на рис. 3. Штриховыми линиями отмечены моменты времени, которым соответствуют давления в системе подачи (рис. 3,а) и в камере сгорания (рис. 3,б).

По давлениям подачи и ходу поршня

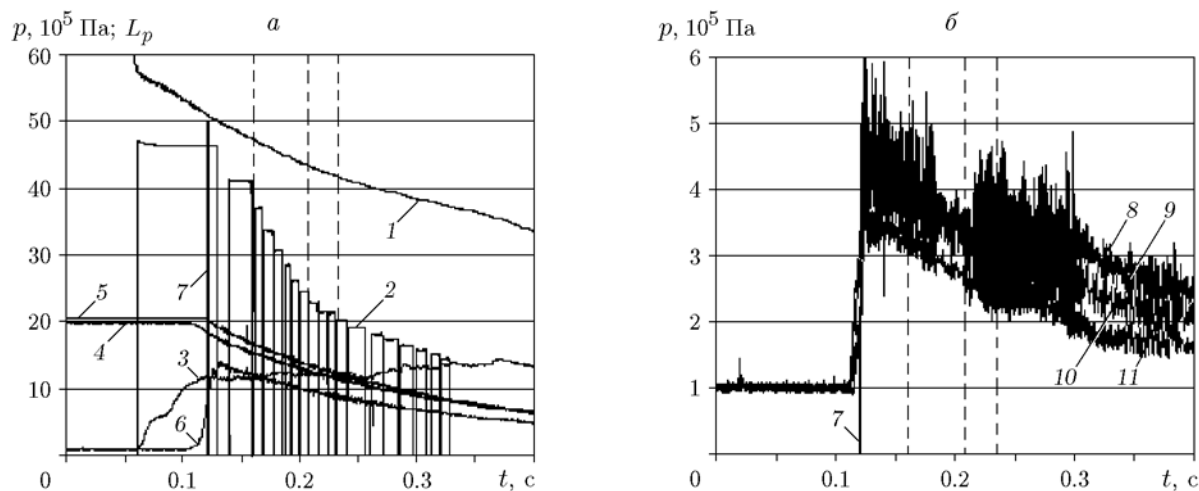


Рис. 3. Изменение давлений подачи и хода поршня расходомера в системе подачи (а) и изменение давления в камере сгорания (б):

1 —  $p_{r,sg}$ , 2 —  $L_p$ , 3 —  $p_{m,sg}$ , 4 —  $p_{r,a1}$ , 5 —  $p_{r,a2}$ , 6 —  $p_{m,a}$ , 7 — импульс иницирования, 8, 9, 10, 11 — давление в камере сгорания, зарегистрированное датчиками на расстоянии 5, 47, 87, 126 мм от цилиндрической поверхности

расходомера невозможно определить характер процесса в камере сгорания. Однако давление в ней заметно реагирует на смену режима. Развитые колебания наблюдаются при НСД и в режиме с пульсирующим горением. При реализации стабильного горения колебания давления заметно ослаблены.

## 2.2. Добавка к бурому углю воды

Добавка воды сильно меняла физические свойства угля — от «сухого» (при исходной влажности  $W^{ru} = 15\%$ ) до комковатой вязкой массы ( $W^{ru} = 30\%$ ) и сметанообразной текучей массы ( $W^{ru} = 54\%$ ). Обнаружено, что через использованную форсунку продавливается уголь влажностью  $W^{ru} \leq 30\%$ . При влажности  $W^{ru} = 34\%$  продавлены были лишь первые порции угля, а при  $W^{ru} = 54\%$  весь коллектор угля и отверстия форсунок оказались забиты плотной угольной массой, которую пришлось выбивать металлическими инструментами. Таким образом, при  $W^{ru} \geq 34\%$  водоугольная смесь ведет себя как неньютоновская жидкость (реологический раствор), изменяющая свои физические свойства при механических воздействиях [9] (в данном случае при ударном воздействии поршня в расходомере [6] до разделения фаз). Во всех случаях, когда удавалось продавить двухфазную смесь угля и воды, в камере сгорания реализовывались режимы НСД или горения. Пример типичного режи-

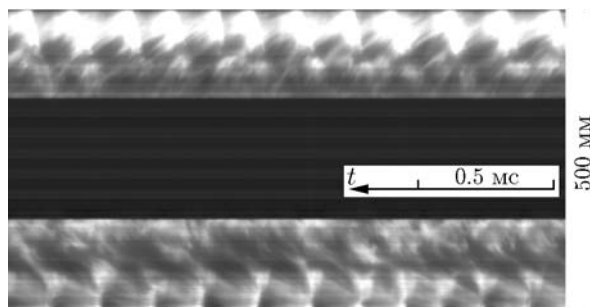


Рис. 4. Фоторегистрограмма (фрагмент) режима с ПДВ при  $W^{ru} = 23.3\%$ ,  $g_{\Sigma} = 534 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ,  $\phi_{\Sigma} = 1.52$ ,  $G_{sg}/G'_C = 0.16$ ,  $p_{c1} = 4.3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $D = 1.58 \text{ км}/\text{с}$ ,  $n = 5$  ( $f = 5.2 \text{ кГц}$ )

ма НСД при  $W^{ru} = 23.3\%$  приведен на рис. 4. Здесь зафиксировано пять ПДВ, движущихся по направлению завихрения. Структура и течение в их окрестности не отличаются от рассмотренных выше при добавке инертных твердых частиц (см. рис. 2,а). Режимы горения и наблюдающееся иногда пульсирующее горение с частотой  $f \approx 0.6 \text{ кГц}$  аналогичны приведенным на рис. 2,б,в. Принципиально не отличаются и осциллограммы процессов при изменении влажности, кроме хода поршня  $L_p$ .

## 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Режимы с пульсациями горения наблюдали ранее в вихревой плоскорадиальной камере

диаметром  $d_{c1} = 204$  мм при сжигании в воздухе древесного угля [3, 7]. Они классифицированы как продольные детонационные волны, движущиеся вдоль радиуса камеры, поскольку оптически фиксировалось движение их фронтов. Периодическое возгорание горючей смеси вблизи цилиндрической поверхности камеры (см. рис. 2,б) не выявило движения волн в радиальном направлении. Однако одновременность возгорания смеси в противоположно расположенных окнах и непосредственно у стенки (при обычном горении на расстоянии около 15 мм от стенки, см. рис. 2,б) позволяет утверждать наличие пульсирующих радиальных ударных волн. Эти волны, отражаясь от цилиндрической стенки, вызывают воспламенение горючей смеси. Несгоревшая смесь за период между отражениями волн (темные участки фоторегинограммы) сгорает в отраженных волнах уже ближе к выходу из камеры (вторичные области свечения).

Во время экспериментов плавно уменьшаются расходы воздуха и синтез-газа (см. изменение давлений в ресиверах на рис. 3,а, поз. 4, 5, 1). Однако сильно изменяется расход угля, что заметно отражается на соотношении компонентов (рис. 5) и смене режимов. Причиной может служить неустойчивость двухфазного течения через отверстия форсунок, количественные оценки которого по расходу приведены в [7].

Очевидно, что с увеличением инертных добавок снижается скорость детонации смеси

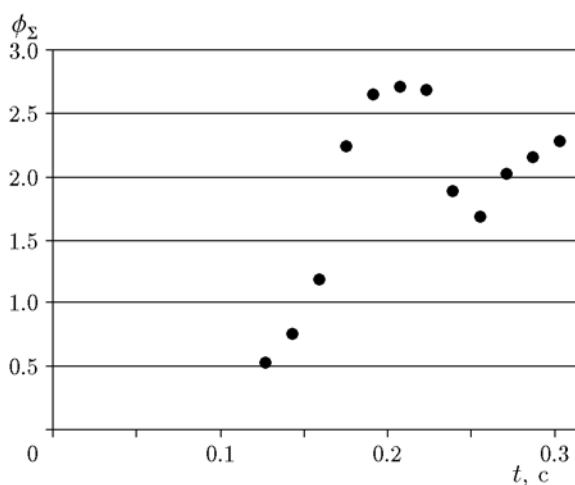


Рис. 5. Изменение суммарного коэффициента избытка горючего в ходе эксперимента при  $A^d = 40\%$

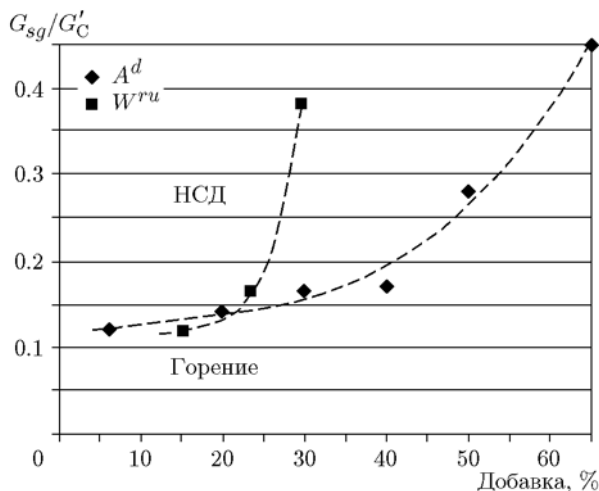


Рис. 6. Границы области существования НСД в зависимости от степени минерализации угля  $A^d$ , влажности  $W^{ru}$  и отношения расходов синтез-газа к горючей составляющей угля  $G_{sg}/G'_C$

и увеличивается количество подмешиваемого к углю синтез-газа, необходимое для реализации НСД. Обобщение экспериментальных результатов позволило провести границы между НСД и горением, которые показаны штриховыми линиями на рис. 6. Видно, что при увлажнении угля граница более крутая и НСД обрывается при меньшем содержании добавки (29,8 ÷ 34 %). Согласно рис. 6 в режиме НСД может сгорать лишь добываемый бурый уголь группы Б3 и частично Б2, имеющие влажность  $W^{ru} = 19 \div 30$  и  $30 \div 40\%$  соответственно [8]. Однако отмечается, что на воздухе бурый уголь быстро теряет влагу и крошится на мелкие куски. Возможно, что при некоторой выдержке на поверхности земли весь уголь групп Б2 и Б1 ( $W^{ru} > 40\%$ ) можно сжигать детонационным способом. Влажность каменного угля и антрацита намного меньше предельных значений для НСД —  $W^{ru} \leq 10\%$  [8], поэтому не должно возникать проблем при их детонационном сжигании.

При минерализации угля пределы существования НСД расширяются. Причем до  $A^d = 40\%$  ограничение на НСД по синтез-газу возрастает незначительно. При  $A^d > 65\%$  происходит резкое отклонение границы области существования вверх, и уже при  $A^d = 70\%$  НСД прекращается, наблюдается лишь горение со следами пульсаций светимости. Согласно [8] минерализация бурого угля всех групп

составляет  $A^d = 7 \div 45$  %, а каменного угля и антрацита —  $A^d < 35$  %, поэтому она не препятствует осуществлению детонационного режима горения. Из табл. 1 и рис. 6 следует, что необходимый для НСД расход синтез-газа, отнесенный к расходу всей массы угольной смеси  $G_C$ , практически постоянный —  $G_{sg}/G_C = 0.12 \div 0.14 \approx \text{const}$ . Поэтому в практических приложениях необязательно расход газа должен коррелировать с количеством добавки, можно ориентироваться на общий расход угольной массы.

Необходимо отметить, что опыты с совместной добавкой к углю твердых инертных частиц и его увлажнением не проводились. Однако из рис. 6 следует, что лимитирующим фактором детонационного горения угля будет его увлажненность. При использовании синтез-газа другого состава ( $\text{CO} + 2\text{H}_2$  или  $\text{CO} + \text{H}_2$ ) границы области существования НСД будут выше, так как в исходном состоянии угля предельное значение отношения  $G_{sg}/G'_C$  для реализации НСД увеличивается [3]. Наиболее благоприятно для развития НСД использование водорода [3, 4], который уменьшает нижний предел ее существования по соотношению горючий газ / горючая часть угля.

Попробуем объяснить, почему твердые инертные добавки меньше ограничивают существование НСД по сравнению с увлажнением. При математическом моделировании подавления детонации водородокислородной смеси инертными частицами [10] было показано, что их внесение приводит к дефициту скорости (рис. 7). Добавки аргона и крупных частиц оксида кремния (размером  $10^{-4}$  м) в меньшей степени влияют на существование детонации, чем добавки размером  $10^{-5}$  м и тем более  $10^{-6}$  м. Прекращение детонации происходит при добавках  $\xi_2 \approx 98, 90, 33$  и  $5$  % соответственно и дефиците скорости  $\eta = D/D_{CJ} \approx 0.4$  (здесь  $D_{CJ}$  — скорость идеальной детонации Чепмена — Жуге водородокислородной смеси).

Поскольку в нашей работе размер частиц диоксида титана был  $10^{-5}$  м и использовалась химически менее активная угольно-воздушная смесь с добавкой синтез-газа, то следовало ожидать прекращения НСД при величине инертной добавки меньше 33 %. Действительно, в расчете на всю топливовоздушную смесь детонация прекращалась при  $\xi_2 \approx 8$  % и  $\eta \approx 0.9$ . Однако, если считать азот воздуха в качестве газообразной инертной добавки к топливокисло-

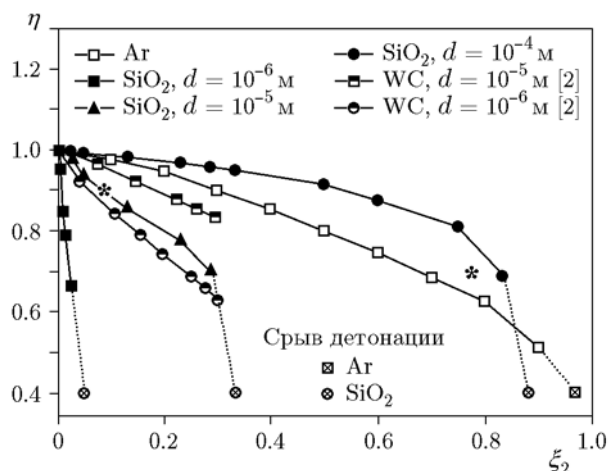


Рис. 7. Влияние инертных добавок на существование детонации в неподвижной водородокислородной смеси [10] и на пределы существования НСД угольно-воздушной смеси в вихревой радиальной камере

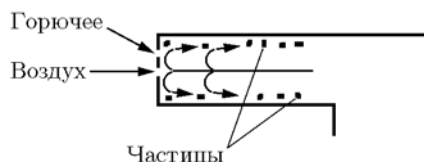


Рис. 8. Схема сепарации тяжелых частиц в пограничные слои течения в радиальной вихревой камере

родной составляющей смеси, то граница перемещается в точку с общей добавкой  $\xi_2 \approx 76$  % при дефиците скорости  $\eta \approx 0.7$ . То есть химически гораздо менее активная смесь в условиях вихревой камеры ведет себя примерно одинаково с неподвижной активной смесью с добавками крупных твердых частиц или инертных газов. По-видимому, работает специфика течения в этой камере: во-первых, наличие горячих точек в течении и хорошее перемешивание [11, 12], во-вторых, сепарация тяжелых частиц в пограничные слои [13]. По второй причине ядро потока освобождается от тяжелых частиц, что способствует детонации горючей смеси (рис. 8).

При увлажнении угля сепарируются только минеральная составляющая и наиболее крупные частицы угля. Связанная с мелкими частицами угля вода остается в ядре потока и, являясь инертной добавкой, ослабляет ПДВ. По-видимому, некоторая часть воды и поддерживает детонацию, участвуя в реакции «водя-

ного пара» [9]. В связи с этим увлажнение минерализованного угля должно сдвигать предел существования НСД по влажности в сторону увеличения вплоть до способности его продавливания сквозь отверстия форсунок ( $W^{ru} \approx 34\%$ ), так как часть влаги унесут с собой тяжелые частицы минерала.

Таким образом, при экспериментальном моделировании состава низкосортных углей и шламов показано, что имеющиеся отвалы угля вполне можно выжигать в детонационных камерах. При этом расходы и виды горючего газа (транспортного средства и промотора химической реакции) должны соответствовать составу шламов и предварительному дроблению в них угля до микронных фракций. Крупные и более прочные минералы могут сохранять свои размеры: чем они крупнее (но не больше размеров отверстий форсунок), тем предпочтительнее условия для детонации. Желательно использовать для сжигания более сухие угли.

## ВЫВОДЫ

1. Впервые проверено влияние добавок твердых минералов (диоксида титана) и воды в бурый уголь на возможности его сжигания в режиме непрерывной спиновой детонации.

2. Показано, что в зависимости от количества минерала, воды и синтез-газа, добавляемых в уголь, могут реализовываться режимы непрерывной спиновой детонации, горения и пульсирующего горения. Сепарация тяжелых частиц твердых примесей в пограничные слои позволяет сжигать угли в детонационном режиме при их зольности до 65%. Предел существования детонации по влажности близок к способности продавливания угля через форсунки (30 ÷ 34%).

3. Определены границы между областями существования детонации и горения в координатах «отношение расходов синтез-газ / горючая часть угля — минеральная составляющая угля и влажность». Показано, что лимитирующим фактором для детонации является влажность, а детонационным способом можно сжигать практически все низкосортные угли и шламы, предварительно раздробив в них уголь на частицы порядка 1 ÷ 10 мкм.

4. С увеличением минеральной добавки и воды в смесях с углем необходимо повышать расходы синтез-газа для детонационного сжигания горючей составляющей угля.

Авторы признательны С. А. Ждану за постоянное внимание к работе и ряд высказанных критических замечаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин С. Н., Будкова Е. В., Исьемин Р. Л., Коняхин В. В., Казмин И. В., Тишин В. В. Твердотопливный водогрейный котел с топкой полукипящего слоя // Новости теплоснабжения. — 2002. — № 6. — С. 14–15.
2. Кузьмин С. Н., Будкова Е. В., Михалев А. В., Исьемин Р. Л., Коняхин В. В., Бандура Е. М. Снижение затрат на топливо за счет сжигания угольных шламов в водогрейных котлах, оборудованных топками с полукипящим слоем // Новости теплоснабжения. — 2005. — № 1. — С. 27–29.
3. 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.
4. 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.
5. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А. Непрерывная спиновая детонация угольно-воздушной смеси в плоскорadiaльной камере проточного типа // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 93–99.
6. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А. Детонационное сжигание частиц антрацита и бурого угля в проточной радиальной камере // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 6. — С. 94–103.
7. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
8. Васильев С. Н. и др. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. — СПб.: Изд-во НПО «Профессионал», 2005. — Ч. II, разд. 9.1.
9. Большая энциклопедия нефти и газа [Информационный ресурс]. — <http://www.ngpedia.ru/id634255p2.html>.
10. Федоров А. В., Тропин Д. А., Бедарев И. А. Математическое моделирование подавления детонации водородокислородной смеси инертными частицами // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 103–115.
11. 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.



12. Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф., Полозов С. В., Голубев Ю. В. Иницирование детонации в потоках топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 3. — С. 110–120.
13. Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф. Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 2. Вихревая структура течения // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 1. — С. 41–49.

*Поступила в редакцию 10/XI 2016 г.*

---