

УДК 534.2,546.2

## НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ УГОЛЬНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ ПРОТОЧНОГО ТИПА

Ф. А. Быковский<sup>1</sup>, С. А. Ждан<sup>1,2</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

Исследованы режимы непрерывной спиновой детонации частиц каменного угля в потоке воздуха в плоскорadiaльной камере проточного типа диаметром 500 мм. Использован измельченный кузбасский длиннопламенный каменный уголь с размером частиц  $1 \div 7$  мкм, содержащий 24.7 % летучих и 14.2 % золы, влажностью 5.1 %. Для транспортирования угля в камеру и промотирования химической реакции на поверхности твердых частиц подмешивали водород. С целью снижения потерь давления воздуха в каналах, соединяющих коллектор и камеру, их сечение увеличивали до предельных размеров (25 см<sup>2</sup>) и уменьшали диаметр выходного отверстия камеры. Изменяли также угол направления потока воздуха и геометрию камеры. Достигнут минимальный уровень перепада давления в каналах подачи воздуха (16 %) при сохранении устойчивости непрерывной спиновой детонации в камере. Построена область реализованных режимов непрерывной спиновой детонации в координатах «коэффициент расхода горючего — удельный расход смеси». Результаты исследования детонационного сжигания твердых топлив могут найти практическое применение в энергетике, химической промышленности, в решении вопросов снижения загрязнения окружающей среды продуктами сгорания, в частности шлаками.

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

### ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени режимы непрерывной спиновой детонации (НСД) угольно-воздушных смесей реализованы в условиях подачи воздуха в камеру сгорания через узкие каналы, перепад давления в которых в несколько раз превышал критический [1–6]. Это обстоятельство неизбежно связано с повышением давления подачи воздуха, большой потерей полного давления в каналах, аналогично [7]. В энергетических установках [8] воздух в камеру сгорания поступает сплошным потоком (проточный вариант камеры сгорания), а горючее впрыскивается в поток через отверстия форсунок. С точки зрения экономичности сжигания топлива необходимо стремиться к уменьшению давления подачи воздуха (снижению мощности компрессора) и повышению давления в камере

сгорания, поскольку это приводит к большей степени расширения продуктов на выходе из камеры и, следовательно, к совершению большей механической работы (увеличению КПД). Повышение давления в камере благоприятно и для поддержания детонации. Однако при сближении этих давлений усиливается влияние процессов в камере, а именно детонационных волн, на систему подачи, что в конечном счете приводит к ликвидации детонационных волн. Поэтому существует предел для реализации НСД при сближении указанных выше давлений.

Цель настоящей работы — в вихревой плоскорadiaльной камере диаметром 500 мм осуществить НСД во взвеси в водороде частиц каменного угля с воздухом при минимальных потерях полного давления воздуха на входе в камеру сгорания. Снижение потерь достигается путем расширения каналов для воздуха и изменения их наклона к радиусу камеры, а также изменения геометрии камеры, в частности сужения до предела выходного отверстия.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема вихревой плоскорadiaльной камеры

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 26.3, Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-08-00225) и фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ 247.2012.1).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А., 2013.

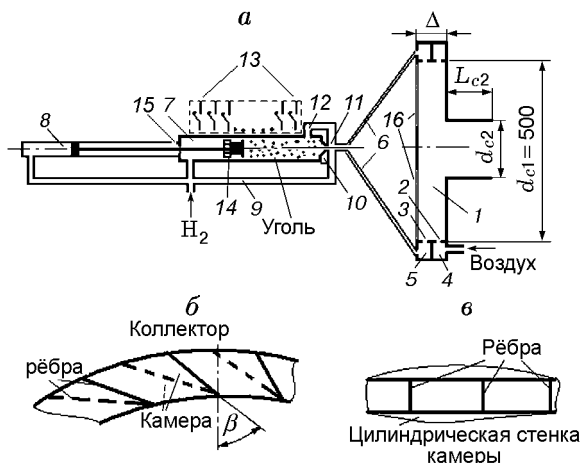


Рис. 1. Схема камеры (а) и положения каналов для подачи воздуха в проточную камеру (б — проекция в радиальной плоскости, в — вид со стороны камеры)

диаметром  $d_{c1} = 500$  мм с истечением к центру (1 на рис. 1,а) приведена в работе [4], а система подачи двухфазного топлива (уголь — водород) аналогична использованной в [6]. Расстояние между двумя плоскими радиальными стенками камеры устанавливали равным  $\Delta = 13, 15$  или  $27$  мм. Ряд опытов был проведен при наклоне одной из стенок под углом  $\alpha = 7^\circ$  ( $\Delta = 15$  мм). Выхлоп продуктов реакции происходил через отверстие диаметром  $d_{c2} = 250, 175$  или  $125$  мм, расположенное в одной из плоских стенок. В первом случае длина цилиндрической части канала для выхлопа составляла  $L_{c2} = 205$  мм, а во втором и третьем —  $12$  мм, что равно толщине диска, перекрывающего отверстие диаметром  $250$  мм.

Воздух и частицы угля подавали в камеру через ряд отверстий 2 и 3, равномерно размещенных на цилиндрической стенке. 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  $V_{r,a} = 43$  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 водородом, поступающим из ресивера объемом  $V_{r,H} = 10.3$  л (на рисунке не показан). Часть водорода через байпас 9 и регулируемое отверстие диафрагмы 10

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 путем подачи водорода через второй байпас 12. Ход поршня, выталкивающего уголь, дискретно фиксировали магнитоуправляемыми датчиками (герконами) 13, расположенными на наружной поверхности цилиндра и замыкающими электрическую цепь при прохождении кольцевого магнита 14, находящегося на поршне. Утечку водорода через уплотнение штока основной поршневой системы и вспомогательный поршень стравливали через дренажное отверстие 15. Поршень, толкающий уголь, имел зазор со стенкой цилиндра  $0.1$  мм, поэтому насыщение угля водородом происходило и через этот зазор, а не только через байпас 9, имеющий на выходе калиброванную диафрагму 10 диаметром  $d_e = 4$  мм.

Попытка реализовать подачу воздуха сплошным потоком из коллектора в плоскорadiaльную камеру стандартным способом через кольцевую щель показала, что закрутка потока воздуха не происходит. Поэтому входным устройством для воздуха служили проточные каналы с перегородками-ребрами, направленными под углом  $\beta = 60$  или  $75^\circ$  к радиусу (рис. 1,б,в, сплошная или штриховая линия соответственно). Толщина ребер изменялась в диапазоне  $s = (2 \div 0.1)b$ , где  $b$  — ширина каналов, определяемая длиной перпендикуляра, проведенного от острой кромки ребра к соседнему ребру (тонкая линия). Площадь проходного сечения каналов ( $S_{Ai}$ ) определялась произведением ширины на высоту канала. Данные по входным устройствам для воздуха в плоскорadiaльную камеру сгорания  $A_i$  сведены в табл. 1.

Форсунка угля 3 имела 150 отверстий прямоугольного сечения шириной  $0.5$  мм и высотой  $1.0$  мм, их общая площадь сечения составила  $150 \times 0.5 \times 1.0 = 75$  мм<sup>2</sup>. Отверстия распределены равномерно по цилиндрической поверхности выше ребер для воздуха в направлении радиуса камеры и под углом  $45^\circ$  к плоской стенке (см. рис. 1,в).

Начальные давления воздуха и водорода в ресиверах устанавливали одинаковыми во всех опытах:  $p_{r,a0} = (85 \pm 1) \cdot 10^5$  Па и  $p_{r,H0} = (77 \pm 1) \cdot 10^5$  Па. Расход угля во время подачи в камеру ( $t \approx 0.25$  с), определяемый по перемещению поршня расходомера [6], составлял

Таблица 1  
Параметры входных устройств для воздуха

$A_i$	Количество каналов	Сечение канала, мм	$\beta$ , град	$S_{Ai}$ , см <sup>2</sup>	$S_{Ai}/S_\delta$
A1	250	1.0 × 2.0	60	5	0.16
A2	250	1.5 × 2.8	60	10.5	0.239
A3	250	2.0 × 3.0	60	15	0.318
A4	40	17.0 × 3.0	60	20.4	0.433
A5	50	10.0 × 3.0	75	15	0.318
A6	50	10.0 × 5.0	75	25	0.318
A7	50	8.0 × 17.0	75	68	0.255

Примечание.  $S_\delta = \pi d_{c1} \delta$  — площадь кольцевой щели без учета площади направляющих ребер.

$G_C = 0.2 \div 3.3$  кг/с. Расходы газов определяли по снижению давления в ресиверах [9]. Расход воздуха изменялся в диапазоне  $G_a = 11.3 \rightarrow 5.1$  кг/с и кроме входного устройства A1 лимитировался также минимальной площадью проходного сечения клапана ( $S_v = 8$  см<sup>2</sup>). Коэффициент избытка угля изменялся в пределах  $\phi_C = 0.25 \div 3.5$ . Расходы водорода в разных опытах и в течение одного опыта находились в интервале  $G_H = 130 \div 37$  г/с ( $47 \div 2.3$  % от расхода угля или  $1.3 \div 0.5$  % от расхода воздуха). Продукты сгорания вытекали в атмосферу. Иницирование процесса, его непрерывная фоторегистрация, измерение давления в системе подачи и камере, а также запись данных и их обработка компьютерной системой аналогичны [6].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В области указанных выше геометрических размеров камер и условий подачи возду-

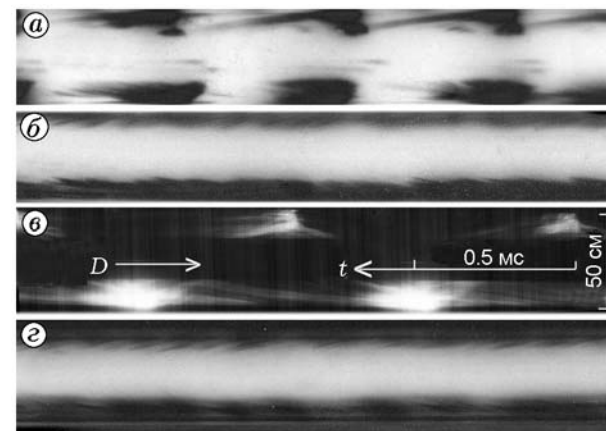


Рис. 2. Фрагменты фоторегистрограмм характерных режимов сжигания угля:

a, б — НСД, в, г — обычное горение

ха и горючих компонентов были осуществлены режимы непрерывного сжигания угольно-воздушной смеси с добавкой водорода как в поперечных (спиновых) детонационных волнах (ПДВ), так и в условиях турбулентного горения. Режим сжигания угля в камере сгорания с входным устройством A1, имеющим наименьший размер каналов, угол наклона к радиусу  $\beta = 60^\circ$  и максимальный диаметр выходного отверстия ( $d_{c2} = 250$  мм), считали базовым для выполнения поставленной цели. В камерах с такими каналами ранее были реализованы устойчивые режимы НСД [6]. На рис. 2 приведены фрагменты (длительностью 1.9 мс) типичных фоторегистрограмм процесса сжигания угля при использовании воздушных каналов с возрастающей площадью сечения A2, A4, A6 и A7, а в табл. 2 — значения параметров представленных на рис. 2 режимов, которые можно считать постоянными за соответствующую

Таблица 2  
Параметры процессов детонации и горения, соответствующих фоторегистрограммам на рис. 2

Опыт	$A_i$	$\Delta$ , мм	$d_{c2}$ , мм	$p_{m,a}$ , $10^5$ Па	$p_{c1}$ , $10^5$ Па	$\Delta p/p_{m,a}$	$G_\Sigma$ , кг/с	$\phi_C$	$G_H/G_C$ , %	$D$ , км/с	$n$
I	A2	13	250	31.5	7.3	0.768	8.5	2	6	1.48	2
II	A4	15	250	17.8	5.8	0.674	12.1	1.4	7	—	—
III	A6	27	125	15.9	13.3	0.16	7	2.89	4	1.8	1
IV	A7	27	125	20.7	18.3	0.16	12.3	1.89	5.7	—	—

Примечание.  $G_\Sigma = G_a + G_C + G_H$ ;  $\Delta p = p_{m,a} - p_{c1}$ , где  $p_{m,a}$  — давление в коллекторе воздуха,  $p_{c1}$  — давление на расстоянии 5 мм от цилиндрической поверхности камеры;  $D$  и  $n$  — скорость и число ПДВ.

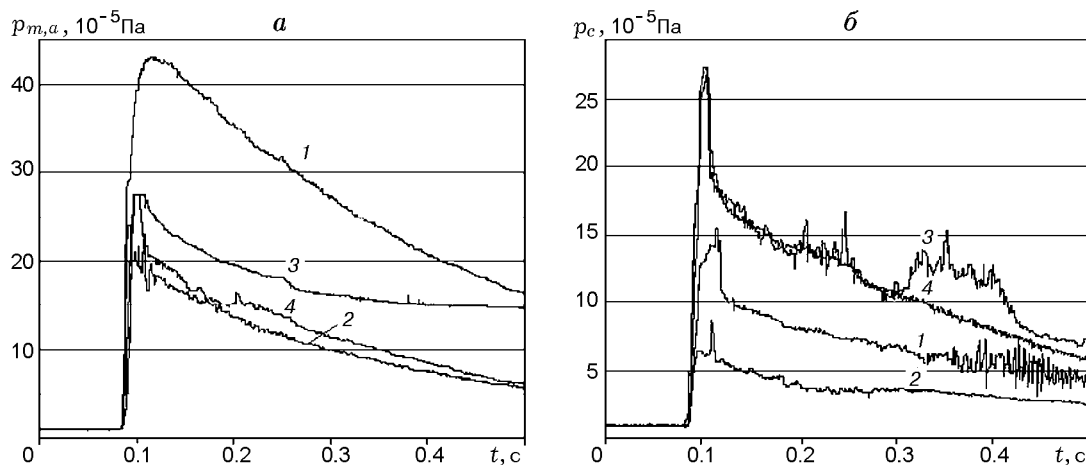


Рис. 3. Осциллограммы давления:

*a* — в коллекторе воздуха ( $p_{m,a}$ ), *б* — в камере ( $p_{c1}$  — на расстоянии 5 мм от отверстий форсунок горючего), I–IV соответствуют позициям I–IV на рис. 2 и в табл. 2

ший отрезок времени. НСД, фрагмент которой помещен на рис. 2, *a*, продолжалась 0.3 с, а на рис. 2, *б* — 0.1 с. Направление движения детонационных волн в верхнем окне показано стрелкой (в нижнем окне волны движутся в противоположном направлении). Структура детонационных волн аналогична наблюдаемой в работе [6].

На рис. 3, *a* приведены осциллограммы давления в коллекторе воздуха, а на рис. 3, *б* — осциллограммы давления в камере (в ее начале —  $p_{c1}$ ). Резкое уменьшение давления в камере после его подъема (см. рис. 3, *б*) соответствует моменту иницирования процесса, а дальнейшее уменьшение — снижению расходов компонентов смеси. Давление  $p_{c1}$ , а также другие давления вдоль радиуса камеры увеличивались с уменьшением диаметра выходного отверстия камеры  $d_{c2}$ , а давление в коллекторе  $p_{m,a}$  зависело от площади сечения каналов для подачи воздуха в камеру и их наклона к радиусу, а также от диаметра выходного отверстия камеры  $d_{c2}$  (через давление  $p_{c1}$ ).

#### Варьирование площади сечения каналов для подачи воздуха и их направления

При  $d_{c2} = 250$  мм и установке устройства А2 вместо А1 дополнительно создавались условия для сверхкритического в среднем перепада давления на них. Как и для устройства А1, были реализованы устойчивые режимы НСД. Однако дальнейшее увеличение площади сечения каналов при угле наклона  $\beta = 60^\circ$  привело к

ликвидации НСД в камере (см. табл. 1, устройства А3 и А4). Это связано с ростом влияния процессов в камере, с одной стороны, на систему подачи, а с другой — на изменение картины течения в камере из-за увеличения радиальной составляющей скорости течения исходной смеси (см. рис. 1, *б, в*). По-видимому, переставала реализовываться особая для плоскорadiaльных камер вихревая структура течения [10].

Увеличение угла наклона каналов до  $\beta = 75^\circ$  повысило влияние ребер каналов на закрутку потока в камере, и при той же площади их сечения (ср. устройства А3 и А5, табл. 1) установка устройства А5 обеспечила реализацию устойчивой НСД. Следует заметить, что увеличение угла  $\beta$  приводит к уменьшению площади проходного сечения каналов входного устройства. При приближении к углу  $\beta = 90^\circ$  и сохранении числа каналов ( $N = 50$ ) при определенной толщине направляющих ребер каналы полностью перекрываются. При уменьшении числа каналов можно обеспечить необходимую площадь их сечения и при  $\beta = 90^\circ$ , однако это может нарушить структуру течения в камере (аналогично установке устройств А3 и А4). Рост площади сечения каналов возможен за счет увеличения их высоты, но это неизбежно влечет и увеличение расстояния между плоскими стенками  $\Delta$ . Если устройство А6 вписывалось в промежуток между стенками камеры  $\Delta = 15$  мм, то для устройства А7 потребовалось увеличить расстояние до  $\Delta = 27$  мм. По-видимому, в этой камере обеспечивалась

структура течения, наблюдаемая в [10], но существовало сильное влияние процессов в камере на систему подачи. В результате при любых расходах топливоздушная смесь и благоприятном соотношении компонентов, при всех выходных отверстиях в камере наблюдалось обычное турбулентное горение (см. рис. 2,2). Очевидно, что для реализации НСД в диапазоне высоты каналов  $5 \div 15$  мм существует их предельная величина, которая в данной работе не определялась.

### Варьирование диаметра выходного отверстия камеры $d_{c2}$

Уменьшение выходного отверстия камеры  $d_{c2}$  при указанных выше размерах  $\Delta$  всегда приводило к увеличению давления в камере и к снижению потери давления в каналах подачи воздуха  $\Delta p/p_{m,a} = (p_{m,a} - p_{c1})/p_{m,a}$ , т. е. способствовало достижению поставленной в работе цели. При этом НСД была реализована при установке всех устройств, кроме А7.

В камере с выходными отверстиями  $d_{c2} = 250$  и  $175$  мм в режимах НСД с большим количеством ПДВ ( $n > 2$ ) и при обычном горении перепад давления в каналах был сверхкритическим, поэтому взаимовлияние процессов в камере и системе подачи было незаметным. Оно начинало слабо проявляться при двухволновом ( $n = 2$ ) и заметно при одноволновом ( $n = 1$ ) режиме НСД.

В камере с выходным отверстием  $d_{c2} = 125$  мм наблюдали режим с одной ПДВ ( $n = 1$ ) и заметное влияние процесса в камере на систему подачи воздуха, так как его истечение было докритическим. При  $\Delta = 27$  мм и устройстве А6 количество водорода, добавляемого к углю для возникновения НСД, было близко к предельному —  $G_H/G'_C \approx 4$  %. Переход горения в непрерывную детонацию отмечен резким подъемом давления в камере  $p_{c1}$  (см. рис. 3,б, кривая III). При этом было реализовано и наибольшее снижение потери полного давления — до 16 %.

### Варьирование расстояния между плоскими стенками $\Delta$

Увеличение расстояния между плоскими стенками  $\Delta$  (зазора) изменяло течение в камере, так как увеличивалась площадь выходного сечения при одном и том же значении  $d_{c2}$ .

Отметим, что в камере имеются две выходные площади сечения: по краю выходного отверстия ( $S_{\Delta 2} = \pi d_{c2} \Delta$ ) и через все отверстие ( $S_{d2} = \pi d_{c2}^2/4$ ). Они одинаковы ( $S_{\Delta 2} = S_{d2}$ ) при  $d_{c2} = 4\Delta$ . Поэтому для зазоров  $\Delta = 13, 15$  и  $27$  мм определяющее влияние на режим в камере оказывала площадь по краю выходного отверстия камеры  $S_{\Delta 2}$ . При зазоре  $\Delta = 27$  мм и выходном диаметре камеры  $d_{c2} = 125$  мм разность площадей  $S_{\Delta 2}$  и  $S_{d2}$  снижалась до минимума ( $106$  и  $123$  см<sup>2</sup> соответственно). В камере с наклоном боковой стенки  $7^\circ$  площадь  $S_{\Delta}$  изменялась нелинейно:  $S_{\Delta} = S_{\Delta 2} + \pi d_{c2} [(d_{c1} - d_{c2})/2] \operatorname{tg} \alpha = \pi d_{c2} \{ \Delta + [(d_{c1} - d_{c2})/2] \operatorname{tg} \alpha \}$ , поэтому для отверстия в камере с  $d_{c2} = 125$  мм достигалось соотношение  $S_{\Delta 2} = 149$  см<sup>2</sup>  $>$   $S_{d2} = 123$  см<sup>2</sup> и площадь  $S_{d2}$  определяла течение в камере. Увеличение зазора  $\Delta$  от  $13$  до  $15$  и  $27$  мм практически не повлияло на характер процесса при выходных диаметрах камеры  $d_{c2} = 250, 175$  и  $125$  мм. Устойчивые режимы НСД были реализованы с устройствами А1, А2, А5 и А6 (см. рис. 2,а,в и табл. 2) для указанных значений  $\Delta$  и в камере с устройством А6 при  $\Delta = 15$  мм и наклоне одной из стенок под углом  $7^\circ$ .

Наблюдалось влияние количества ПДВ на среднее давление в камере ( $p_{c,i}$ , где  $i$  — номер датчика [6]) и системе подачи ( $p_{m,a}$ ). При  $n = 4$  осциллограммы давлений  $p_{c,i}$  и  $p_{m,a}$  ведут себя так же, как и при обычном горении. С уменьшением числа волн до  $n = 2$  фиксируются заметные колебания, а при  $n = 1$  происходит сильное влияние волн в камере на систему подачи. Даже с устройством А2 при появлении одноволнового режима регистрировалось повышение давления в камере с большими амплитудами колебаний (см. рис. 3,б, кривая I, конец процесса). А при использовании устройства А6 давление одновременно повышалось в камере и коллекторе воздуха (см. рис. 3,а,б, кривые III): повышение давления в камере при переходе горения в непрерывную детонацию заметно замедлило уменьшение давления в коллекторе воздуха. Влияние детонационного режима на систему подачи воздуха при  $n = 1$  наблюдали при разборке камеры: направляющие ребра каналов воздуха были отогнуты в сторону вращения детонационных волн (рис. 4).

На рис. 5 приведена область реализованных режимов НСД в координатах  $(\phi_\Sigma, g_\Sigma)$ , где  $\phi_\Sigma = \phi_C + \phi_H$  — суммарный коэффициент избытка горючего (угля и водорода). Для

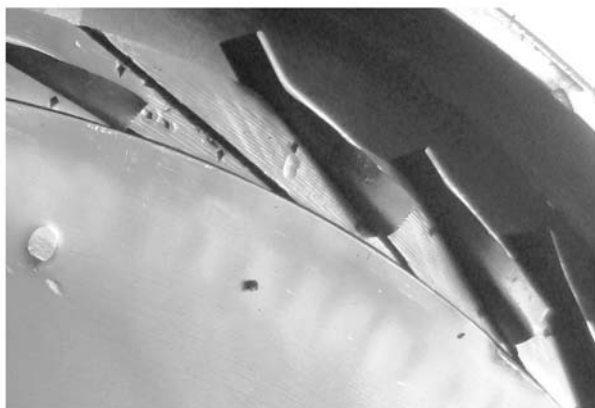


Рис. 4. Фотография направляющих ребер, изогнутых детонационной волной:

$\beta = 75^\circ$ , одну из направляющих выбросило из гнезда (паса)

того чтобы построить область режимов НСД в координатах  $(\phi_\Sigma, g_\Sigma)$ , необходимо вычестить из соответствующей ординаты  $\phi_\Sigma$  конкретного опыта практически постоянную величину  $\phi_H = 0.15 \div 0.4$ . При этом меньшая величина  $\phi_H$  соответствует меньшим значениям  $\phi_\Sigma$ . Такая небольшая разница значений  $\phi_H$  связана с близкими значениями коэффициента расхода в используемых системах подачи воздуха и водорода [9].

Удалось осуществить режимы НСД при минимальных значениях удельного расхода смеси и коэффициента избытка горючего —  $g_{\Sigma \min} = 140 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  и  $\phi_{\Sigma \min} = 0.34$ . Эти минимальные и достигнутые достаточно высокие максимальные значения  $g_{\Sigma \max} = 570 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  и  $\phi_{\Sigma \max} = 3.3$  ограничены возможностями установки и, по-видимому, не являются предельными. Слева и снизу область ограничена точками, соответствующими данным при  $\Delta = 27 \text{ мм}$ , сверху и справа — при  $\Delta = 13$  или  $15 \text{ мм}$ . Существование НСД при большом избытке горючего можно объяснить применением угля полидисперсного состава — наличием необходимого количества мелких частиц для поддержания режима НСД [6], в котором крупные частицы являются балластом и не участвуют в химической реакции. Режим НСД, как правило, запускался при больших значениях  $g_\Sigma$  и малых значениях  $\phi_\Sigma$ , при которых в горючей смеси содержалось наибольшее количество водорода (до  $\phi_H \approx 0.4$ ) и смесь была наиболее химически активной. Поэтому и количество ПДВ было максимальным (до  $n = 6$ ). С развити-

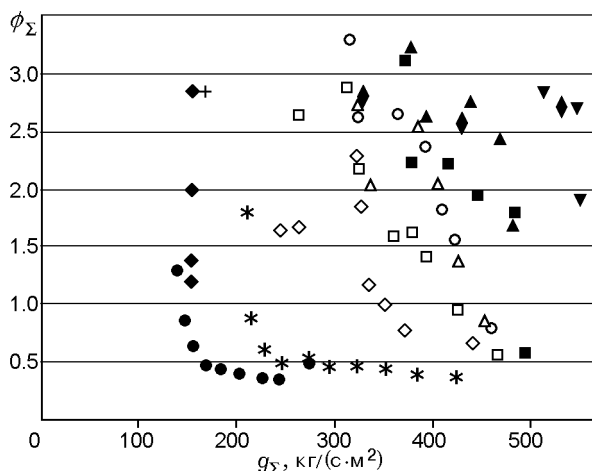


Рис. 5. Реализованная область существования режимов НСД угольно-воздушной смеси с добавкой водорода в плоскорadiaльной вихревой камере диаметром 500 мм:

темные точки соответствуют расширенным каналам, светлые — каналам малого проходного сечения, точки одного вида — данные одного эксперимента, + — режим с минимальным значением  $\Delta p/p_{m,a} = 0.16$

ем НСД смесь обеднялась водородом, давление в камере уменьшалось, что приводило к укрупнению структуры ПДВ и уменьшению их количества. На пределе существовала одна ПДВ со скоростью  $D = 1.9 \div 1.4 \text{ км}/\text{с}$  при соотношении  $G_H/G'_C = 3.4 \div 7 \%$ . Однако по окончании вытеснения угля из поршневой системы подачи в коллектор горючего увеличивалось насыщение угля водородом. Как правило, расход угля в этом случае можно оценить только средним значением, зная количество угля в коллекторе и время полного истечения его в камеру.

Итак, путем увеличения площади сечения каналов для подачи воздуха в камеру и при их наклоне к радиусу камеры под углом  $\beta = 75^\circ$  удалось осуществить НСД в проточном варианте плоскорadiaльной камеры сгорания при достижении минимальной потери давления на воздушных каналах 0.16 (входное устройство А6 и выходной диаметр камеры  $d_{c2} = 125 \text{ мм}$ ).

## ВЫВОДЫ

1. В проточном варианте вихревой камеры плоскорadiaльной геометрии диаметром 500 мм впервые реализованы режимы непрерывного детонационного сжигания угольно-воздушной смеси с добавкой водорода.

2. Минимальная достигнутая потеря полного давления на отверстиях подачи воздуха составила 16 %.

3. Показано, что увеличение наклона каналов для подачи воздуха в камеру к радиусу благоприятно для реализации непрерывной спиновой детонации, а увеличение их площади сечения и уменьшение площади выходного сечения камеры способствуют снижению потерь полного давления воздуха на отверстиях каналов.

4. Обнаружено усиление влияния детонационных волн в камере на систему подачи (давление в коллекторе) при снижении количества детонационных волн, особенно до одной волны.

5. Построена область реализованных режимов непрерывной спиновой детонации в координатах «коэффициент расхода горючего — удельный расход смеси».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А.** Детонационное сжигание угольно-воздушной смеси / Горение твердого топлива: VII Всерос. конф. с междунар. участием: сб. докл. — 2009. — Ч. 2. — С. 34–38.
2. **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.
3. **Быковский Ф. А., Жолобов Ю. А.** Детонация угольно-воздушной смеси в вихревых плоскорадиальных камерах // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. — 2011. — № 4, ч. 3. — С. 667–669.
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. **Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F., Zholobov Yu. A.** Detonation burning of coal // Theory and practice of energetic materials (V. IX). Proc. of the 2011 Intern. Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics, Nanjing, Jiangsu, China, 2011 / Li Shengcai and Niu Peihuan (Eds). — Science Press P. R. China, 2011. — P. 549–557.
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.** О непрерывной спиновой детонации топлив в кольцевых камерах сгорания // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 4. — С. 99–109.
8. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л.** Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. — М.: Машиностроение, 2008. — Т. 1.
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., Ведерников Е. Ф.** Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 2. Вихревая структура течения // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 1. — С. 41–49.

*Поступила в редакцию 21/IX 2012 г.,  
в окончательном варианте — 26/XI 2012 г.*