

УДК 534.2, 546.2

## УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ДЕТОНАЦИОННОГО СЖИГАНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ В ВИХРЕВОЙ ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЙ ПРОТОЧНОЙ КАМЕРЕ

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

<sup>1</sup> *Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 630090, Новосибирск*

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

### Введение

К настоящему времени режимы непрерывной спиновой детонации (НСД) в угольно-воздушных смесях реализованы в условиях подачи воздуха через отверстия форсунок, перепад давления на которых превышал критические значения (вариант ЖРД) [1 – 6]. Это обстоятельство неизбежно связано с повышением давления подачи, большой потерей полного давления на форсунках, аналогично [7]. В энергетических установках [8] воздух в камеру сгорания поступает сплошным потоком, а горючее впрыскивается в поток через отверстия форсунок. С точки зрения экономичности сжигания топлива необходимо стремиться к уменьшению давления подачи воздуха и повышению давления в камере сгорания, что должно приводить к большей степени расширения продуктов на выходе из камеры и, следовательно, совершению большей механической работы (увеличению к.п.д.). Повышение давления в камере благоприятно и для поддержания детонации. Цель настоящей работы – в проточном варианте вихревой плоскорадиальной камеры диаметром 500 мм осуществить режимы НСД во взвеси частиц каменного угля при варьировании площади проходных сечений подачи и угла направления потока воздуха, а также геометрических параметров камеры. Использовали измельченный кузбасский длиннопламенный каменный уголь размером 1 – 7 мкм, содержащий 24.7 % летучих, 14.2 % золы и 5.1 % влажности.

### Постановка экспериментов

Экспериментальная плоскорадиальная камера диаметром  $d_{c1} = 500$  мм с истечением к центру 1 представлена на рис. 1.

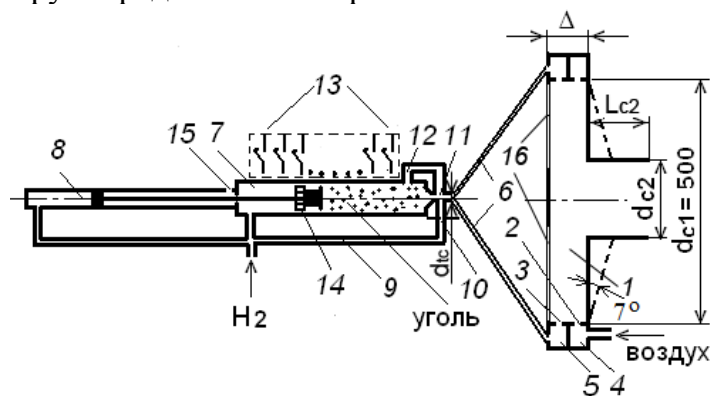


Рис. 1. Схема камеры и система подачи смесевых компонентов.

Расстояние между двумя плоскими радиальными стенками устанавливали  $\Delta = 13, 15$  или  $27$  мм. Ряд опытов был проведён при наклоне одной из стенок от  $\Delta = 15$  мм под углом  $\alpha = 7^\circ$  (см. рис. 1, пунктирная прямая). Выхлоп продуктов реакции происходил в отверстие диаметром  $d_{c2} = 250, 175$  или  $125$  мм, расположенном в одной из плоских стенок. Длина цилиндрической части канала для выхлопа составляла  $L_{c2} = 205$  мм. Частицы угля подавали в камеру через ряд отверстий форсунок 2, а воздух – через каналы 3, равномерно распределённые по цилиндрической стенке и имеющие начало в кольцевых коллекторах 5 и 4, соответственно. Отверстия форсунок горючего (150 отверстий с площадью сечения  $0.5 \times 1.0$  мм<sup>2</sup>) имели наклон  $45^\circ$  к цилиндрической поверхности камеры и направлены вдоль радиуса. Каналы для воздуха располагались в плоскости камеры и имели угол наклона к радиусу  $\beta = 60^\circ$  или  $75^\circ$ . Для более равномерного распределения взвеси частиц угля по коллектору 5 использовали 24 трубки 6. Воздух в коллектор 4 поступал из ресивера объёмом  $V_{гА} = 43.3$  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 объёмом  $V_{гН} = 10.3$  л (на рисунке не показан). Часть водорода через байпас 9 и регулируемое отверстие диафрагмы 10 подавали в трубопровод 11 и смешивали с поступающим в коллектор 5 углём. Выдавливание остатков угля из коллектора 5 после перемещения поршня в крайнее правое положение происходило подачей водорода через второй байпас 12. На входе в трубки 6 участок трубопровода имел диаметр  $d_{тс} = 16$  мм. 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 водорода 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 водородом происходило и через этот зазор, а не только через байпас 9, имеющий на выходе калиброванную диафрагму 10 диаметром  $d_e = 4$  мм. Съёмка процессов производилась через два окна 16, расположенных вдоль радиуса камеры.

Попытка реализовать подачу воздуха сплошным потоком из коллектора в плоскорадиальную камеру стандартным способом через кольцевую щель приводит к невозможности закрутки потока воздуха. Поэтому его закрутка осуществлялась установкой направляющих ребер толщиной 1 или 2 мм на входе в плоскорадиальную камеру сгорания (рис. 2), которые занимали 10 или 20 % площади проходного сечения каналов ( $S_{Ai}$ ), определяемой перпендикуляром, проведённым от острой кромки канала (тонкая линия).

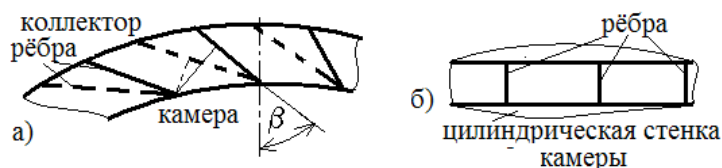


Рис. 2. Схема положения каналов для подачи воздуха в проточную камеру:  
а) проекция в радиальной плоскости; б) вид со стороны камеры.

Данные по проходным сечениям каналов для воздуха на входе плоско-радиальной камеры сгорания  $A_i$  сведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры каналов для воздуха и угол их наклона.

$A_i$	Количество каналов	Площадь сечения канала, мм <sup>2</sup>	$\beta$ , град.	$S_{A_i}$ , см <sup>2</sup>	$S_{A_i}/S_\delta$
A1	250	1.0x2.0	60	5	0.16
A2	250	1.5x2.8	60	10.5	0.239
A3	250	2.0x3.0	60	15	0.318
A4	40	17.0x3.0	60	20.4	0.433
A5	50	10.0x3.0	75	15	0.318
A6	50	10.0x5.0	75	25	0.318
A7	50	8.0x17.0	75	68	0.255

Здесь  $S_\delta = \pi d_{c1} \cdot \delta$  – площадь кольцевой щели без направляющих ребер.

Начальные давления воздуха и водорода в ресиверах устанавливали одинаковыми для всех опытов -  $p_{гА0} = (85 \pm 1) \cdot 10^5$  Па и  $p_{гН0} = (77 \pm 1) \cdot 10^5$  Па. В расходомер 7 загружали около 380 г угля. За время подачи угля в камеру ( $t \approx 0.25$  с) его расход, определяемый по перемещению поршня расходомера [6], составлял  $G_C = (0.2 - 3.3)$  кг/с. Расходы газов определяли по снижению давления в ресиверах [9]. Расход воздуха изменялся в пределах  $G_A = (11.3 \rightarrow 5.1)$  кг/с и кроме форсунки A1 лимитировался минимальной площадью проходного сечения клапана ( $S_v = 8$  см<sup>2</sup>). Коэффициент избытка угля изменялся в пределах  $\phi_c = 0.25 - 3.5$ . Расходы водорода в разных опытах и в течение одного опыта находились в интервалах -  $G_H = 130 - 37$  г/с (47– 2.3% от расхода угля или 1.3 – 0.5 % от расхода воздуха, соответственно). Продукты сгорания вытекали в атмосферу. Иницирование процесса, его непрерывная фоторегистрация, измерение давлений 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 воздуха и горючих компонентов были осуществлены режимы непрерывного сжигания угольно-воздушной смеси с добавкой водорода как в поперечных (спиновых) детонационных волнах (ПДВ), так и при обычном турбулентном горении. На рис. 3 приведены фрагменты (длительностью 1.9 мс) типичных фоторегистрограмм процесса сжигания угля для форсунок A2, A4, A6 и A7, а в табл. 2 – количественные значения параметров, приведённых на рисунке режимов, которые можно считать постоянными за соответствующий отрезок времени. НСД, фрагмент которой помещён на рис. 3,а, продолжалась 0.3 с, а на рис. 3,в – 0.1 с.

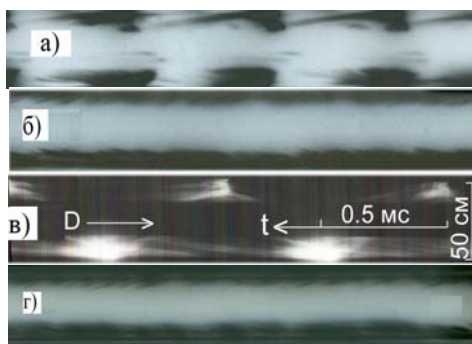


Рис. 3. Фрагменты фоторегистрограмм характерных режимов сжигания угля:  
*a, в* – НСД, *б, г* - обычное горение.

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].

Таблица 2. Параметры процесса режимов при детонации и горении для приведённых на рис. 3 фоторегистрограмм.

Опыт	Ai	$\Delta$ мм	$d_{c2}$ мм	$p_{mA}$ $\cdot 10^{-5}$ Па	$p_{c1}$ $\cdot 10^{-5}$ Па	$\Delta p/p_{mA}$	$G_{\Sigma}$ кг/с	$\phi_c$	$G_H/G_c$ , %	D, км/с	n
<i>a</i>	A2	13	250	31.5	7.3	0.768	8.5	2	6	1.48	2
<i>б</i>	A4	15	250	17.8	5.8	0.674	12.1	1.4	7	–	–
<i>в</i>	A6	27	125	15.9	13.3	0.16	7	2.89	4	1.8	1
<i>г</i>	A7	27	125	20.7	18.3	0.16	12.3	1.89	5.7	–	–

Здесь  $G_{\Sigma} = G_A + G_c + G_H$ ;  $\Delta p = p_{mA} - p_{c1}$ , где  $p_{mA}$  – давление в коллекторе воздуха,  $p_{c1}$  – давление на расстоянии 5 мм от цилиндрической поверхности камеры; D и n – скорость и число ПДВ.

На рис. 4,а приведены осциллограммы давлений в коллекторе воздуха, а на рис. 4,б – давлений в камере  $p_{c1}$  на расстоянии 5 мм от цилиндрической поверхности. Резкое уменьшение давления в камере после его подъёма (см. рис. 4,б) соответствует моменту инициирования процесса, а дальнейшее уменьшение – снижению расходов компонентов смеси. Величина  $p_{c1}$ , а также другие давления вдоль радиуса камеры уменьшаются с увеличением диаметра выходного отверстия камеры  $d_{c2}$ , а давление в коллекторе зависит от площади сечения каналов для подачи воздуха в камеру и их наклона к радиусу, а также диаметра выходного отверстия камеры  $d_{c2}$  (через давление  $p_{c1}$ ).

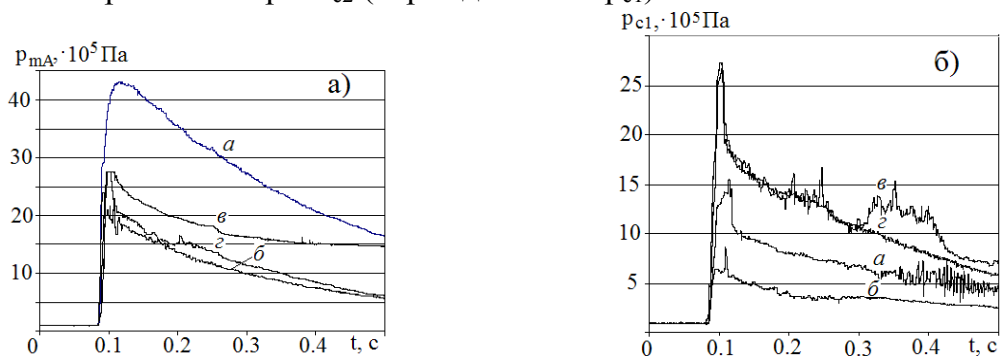


Рис. 4. Осциллограммы изменения давлений: а) в коллекторе воздуха ( $p_{mA}$ ),  
 б) в камере ( $p_{c1}$  - на расстоянии 5 мм от отверстий форсунок горючего).

**Варьирование диаметра выходного отверстия из камеры  $d_{c2}$ .** Уменьшение выходного отверстия из камеры  $d_{c2}$  всегда, при указанных выше размерах  $\Delta$  приводило к увеличению давления в камере и снижению потери давления на каналах подачи воздуха  $\Delta p/p_{mA} = (p_{mA} - p_{c1})/p_{mA}$ , то есть способствовало достижению поставленной в работе цели. С увеличением площади сечения каналов для подачи воздуха относительный перепад давления уменьшался. В проточном варианте камеры при выходном отверстии  $d_{c2} = 125$  мм и расходе смеси  $G_{\Sigma} = 12$  кг/с давление в камере равнялось  $p_{c1} = 18-20 \cdot 10^{-5}$  Па, а в коллекторе -  $p_{mA} = 21-25 \cdot 10^{-5}$  Па ( $\Delta p/p_{mA} = 0.14 - 0.2$ ). Из приведенных данных видно, что перепад давления на каналах докритический, поэтому процессы в камере сгорания и коллекторе воздуха испытывали взаимовлияние, которое при форсунках А3, А4, А6 и А7 становилось настолько значительным, что режимы НСД были кратковременными или не начинались вовсе. Требуются дальнейшие исследования этих режимов с целью выяснения воздействия параметров системы подачи и детонации на условия её существования.

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

**Варьирование расстояния между плоскими стенками  $\Delta$ .** Увеличение 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 всё 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 всегда определяющей на режим в камере была 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 -  $S_{\Delta} = S_{\Delta 2} + \pi d_{c2} [(d_{c1} - d_{c2})/2] \text{tg} \alpha = \pi d_{c2} [\Delta + ((d_{c1} - d_{c2})/2) \text{tg} \alpha]$ , 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 для каждого выходного диаметра камеры  $d_{c2} = 250, 175$  и  $125$  мм. Устойчивые режимы НСД были реализованы с форсунками А1, А2, А5 и А6 (см. рис. 3,а,в и табл. 2) для этих значений  $\Delta$  и в камере с расширением канала под углом  $7^\circ$ .

**Варьирование площади сечения каналов для подачи воздуха и их направлений.** При  $d_{c2} = 250$  мм и установке форсунок А1 и А2 создавались условия для сверхкритического «в среднем» перепада давления на форсунках и были реализованы устойчивые режимы НСД. Однако дальнейшее увеличение площади сечения каналов при угле наклона  $\beta = 60^\circ$  привело к ликвидации режима НСД в камере (см. табл. 1, форсунки А3 и А4). С одной стороны это связано с ростом влияния процессов в камере на систему подачи, а с другой стороны – на изменение картины течения в камере, а именно, увеличение радиальной составляющей

скорости течения исходной смеси. Становится меньше влияние стенок на границе отверстий на закручивание потока (см. рис. 2) и, по-видимому, перестает реализовываться особая для плоскорадиальных камер вихревая структура течения [10].

Увеличение угла наклона каналов до  $\beta = 75^\circ$  повысило влияние стенок каналов на закрутку потока в камере и при той же площади их сечения (сравни форсунки А3 и А5, табл. 1) установка форсунки А5 обеспечивала реализацию устойчивой НСД. Однако повышение угла  $\beta$  приводит к уменьшению площади проходного сечения каналов. При приближении к углу  $\beta = 90^\circ$  и сохранении числа каналов ( $n = 50$ ), а также с учётом толщины направляющих рёбер, каналы полностью перекрываются. С уменьшением числа каналов возможно обеспечение необходимой площади их сечения и при  $\beta = 90^\circ$ , однако это может привести к нарушению структуры течения в камере (аналогично установке форсунок А3 и А4). Рост площади сечения каналов возможен за счёт увеличения их высоты, но это неизбежно влечёт за собой и увеличение расстояния между плоскими стенками  $\Delta$ . Если форсунка А6 вписывалась в канал с  $\Delta = 15$  мм, то форсунка А7 потребовала увеличение канала до  $\Delta = 27$  мм. По-видимому, в этом канале 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 реализовано обычное турбулентное горение (см. рис. 3,г). Понятно, что в диапазоне высоты каналов 5 – 15 мм существует предельное значение, которое в данной работе не определялось, так как требовалось изготовление ряда форсунок с различной высотой канала в этом диапазоне размеров.

Наблюдалось влияние количества ПДВ на среднее давление в камере ( $p_{ci}$ , где  $i$  – номер датчика [6]) и систему подачи ( $p_{mA}$ ). При  $n = 4$  осциллограммы давлений  $p_{ci}$  и  $p_{mA}$  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 форсункой А2 при появлении одноволнового режима регистрировалось повышение давления в камере с большими амплитудами колебаний (см. рис. 3,б, кривая *a*, конец процесса). А для форсунки А6 происходило одновременное повышение давления в камере и коллекторе воздуха (см. рис. 3,а,б, кривые *в*). Влияние детонационного режима с  $n = 1$  наблюдали при разборке камеры – направляющие стенки каналов воздуха были отогнуты в сторону вращения детонационных волн (рис. 5).



Рис. 5. Фотография направляющих рёбер, погнутых в детонационной волне,  $\beta = 75^\circ$ , одну из направляющих выбросило из гнезда (паза).

На рис. 6 приведена область реализованных режимов НСД в координатах  $(\phi_\Sigma, g_\Sigma)$ , где  $\phi_\Sigma = \phi_c + \phi_H$  – сумма коэффициентов избытка горючего угля и водорода.

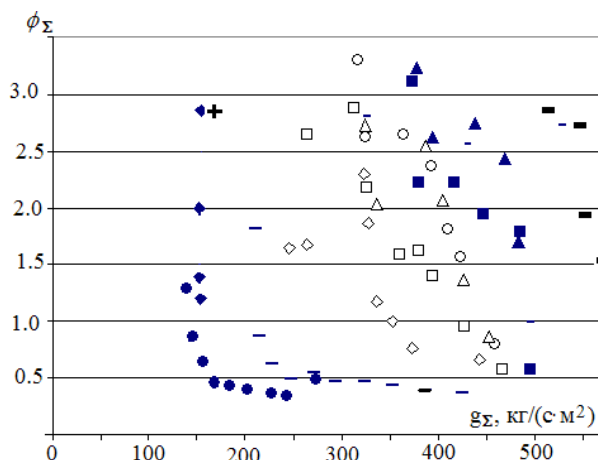


Рис. 6. Реализованная область существования режимов НСД для угольно-воздушной смеси с добавкой водорода в плоскорadiaльной вихревой камере диаметром 500 мм; тёмные маркеры – проточные варианты камер, светлые маркеры – камеры инжекторного типа (ЖРД) [6]; одинаковые маркеры соответствуют данным из одного эксперимента; + - режим с минимальным значением  $\Delta p/p_{mA} = 0.16$ .

Для того, чтобы построить область режимов НСД в координатах  $\phi_c, g_\Sigma$ , необходимо вычесть из соответствующей ординаты  $\phi_\Sigma$  конкретного опыта практически постоянную величину  $\phi_H = 0.15 - 0.4$ . При этом меньшая величина  $\phi_H$  соответствует меньшим значениям  $\phi_\Sigma$ . Такая небольшая разница значений  $\phi_H$  связана с близкими значениями коэффициента расхода  $g$  для используемых систем 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  $\phi_{\Sigma min} = 0.34$ , соответственно. 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, соответствующие данным при  $\Delta = 27$  мм, сверху и справа – для  $\Delta = 13$  или 15 мм. Существование НСД при большом избытке горючего может найти объяснение полидисперсностью угля – наличием необходимого количества мелких частиц для поддержания режима НСД, 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 активна. Поэтому и количество ПДВ было максимальным (до  $n = 6$ ). С развитием процесса 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  $D = 1.9 - 1.4 \text{ км}/\text{с}$  при соотношении  $G_H/G_c^1 = 3.4 - 7 \%$ .

Итак, в проточном варианте вихревой камеры плоскорadiaльной геометрии диаметром 500 мм впервые реализованы режимы непрерывного детонационного сжигания угольно-воздушной смеси с добавкой водорода. Путём увели-

чения площади сечения каналов для подачи воздуха в камеру и их наклоне к радиусу камеры под углом  $\beta = 75^\circ$  удалось осуществить режим НСД при достижении минимальной потери давления на форсунках 0.16. Показано, что уменьшение площади выходного сечения камеры способствует снижению потерь полного давления воздуха на отверстиях форсунок. Обнаружено усиление влияния детонационных волн в камере на систему подачи (давление в коллекторе) при снижении количества детонационных волн, особенно при одной волне. Построена область реализованных режимов непрерывной спиновой детонации в координатах коэффициент расхода горючего – удельный расход смеси.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 26.3, гранта РФФИ № 10-08-00225 и НШ 247.2012.1.

### Литература

1. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф., Жолобов Ю.А. Детонационное сжигание угольно-воздушной смеси / Горение твёрдого топлива. Сб. докл. Ч. 2. VII Всероссийская конференция с международным участием. 2009. 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 / Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород: Изд-во ННГУ 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 (VOL. IX). Proceedings of the 2011 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Nanjing, Jiangsu, China, 2011. Edited by Li Shengcai and Niu Peihuan, Published by Science Press P.R. China, 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 // ПИМТФ. 2000. Т. 41. № 1. С. 41 - 49.