

УДК 534.2,546.2

## ДЕТОНАЦИЯ УГОЛЬНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ВИХРЕВЫХ ПЛОСКОРАДИАЛЬНЫХ КАМЕРАХ

© 2011 г.

Ф.А. Быковский<sup>1</sup>, Ю.А. Жолобов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский госуниверситет

bykovskii@hydro.nsc.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Приведены результаты экспериментального исследования детонационного сжигания угольно-воздушной смеси с добавкой водорода в вихревых плоскорadiaльных камерах диаметром 204 и 500 мм. Использовался измельченный древесный активированный уголь. Впервые реализованы устойчивые режимы непрерывной спиновой и пульсирующей детонации. Показано, что в камере большего размера расширяются пределы непрерывной детонации: увеличивается количество поперечных волн, снижается количество подмешиваемого к углю водорода, сжигаются более крупные частицы топлива.

*Ключевые слова:* угольно-воздушная смесь, непрерывная спиновая детонация, пульсирующая детонация, плоскорadiaльная камера, скорость детонации, волновая структура.

### Введение

Известно, что запасы газа и нефти в Земле истощаются, а угля еще достаточно много. Поэтому постоянно ведутся поиски более эффективных способов сжигания топлива, в том числе и угля. Одним из них является детонационный способ, позволяющий более интенсивно и термодинамически выгодно сжигать углеводородное топливо.

Существуют две принципиальные схемы детонационного сжигания топлива: продольная схема, которую впервые рассмотрел Я.Б. Зельдович (детонационная волна распространяется вдоль потока натекающей смеси [1]), и поперечная схема Б.В. Войцеховского (детонационная волна распространяется поперек потока натекающей смеси [2]). В Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН ведутся работы в основном по схеме Б.В. Войцеховского. В результате осуществлены непрерывные детонационные режимы сжигания практически всех широко известных газообразных и жидких горючих при использовании в качестве окислителя кислорода и воздуха [3, 4]. Цель настоящего исследования – реализация и изучение непрерывного сжигания в воздухе твердого топлива в спиновых (вращающихся) и/или пульсирующих детонационных волнах. Использовался измельченный древесный активированный уголь с размером частиц 5–20 мкм и около 60 мкм.

### Постановка экспериментов

Экспериментальные камеры 1 диаметром  $d_{c1} = 204$  и  $500$  мм представляли собой полузамкнутый объем, ограниченный стенками: одной цилиндрической и двумя плоскими радиальными, расположенными на расстоянии  $H = 15$  мм (рис. 1).

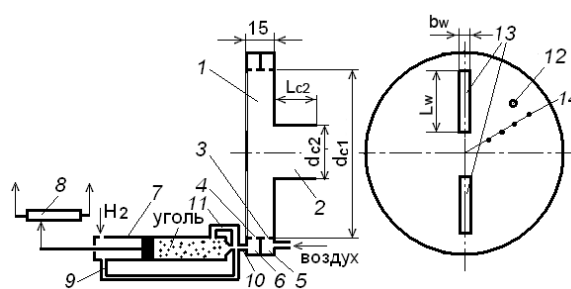


Рис. 1

Для выхлопа продуктов реакции в одной из плоских стенок имелось отверстие 2 диаметром  $d_{c2}$ . Воздух подавался в камеру через ряд отверстий 3 (направлены тангенциально), а частицы угля – через отверстия 4 (направлены вдоль радиуса), равномерно распределенные по цилиндрической стенке. Для равномерного распределения воздуха и частиц угля по отверстиям служили кольцевые коллекторы 5 и 6. Воздух в коллектор 5 поступал из ресивера, а частицы угля в коллектор 6 – из расходомера 7, представляющего собой поршневую систему с

датчиком перемещения поршня  $\delta$ . Давление на поршень осуществлялось водородом, поступающим из ресивера. Часть водорода через байпас  $9$  подавалась в трубопровод  $10$  и газифицировала поступающий в коллектор  $6$  уголь. Выдавливание остатков угля из коллектора  $6$  после перемещения поршня в крайнее правое положение происходило через второй байпас  $11$ . Образующаяся топливо-воздушная смесь воспламенялась разрядом конденсатора на алюминиевую полосу фольги, установленную на электроде  $12$ . Энергия разряда составляла около  $5$  Дж. Продукты сгорания вытекали в атмосферу. Для фотографирования процесса в одной из стенок камер клеивались два окна из органического стекла  $13$ , расположенные вдоль радиуса. Фотосъемка производилась с помощью фоторегистратора с падающим барабаном [5], в котором направление движения пленки было перпендикулярно длинной стороне окон  $13$ . При этом все светящиеся объекты, движущиеся в камере в тангенциальном направлении, фиксировались с компенсацией или раскомпенсацией скорости, а вдоль радиуса – на развертку. Измерялись давления: в ресиверах воздуха и водорода, коллекторах воздуха и угля, а также статические на стенках камеры, усредненные за период между волнами датчиками с временным разрешением более  $1$  мс. Реостатным датчиком  $\delta$  регистрировалось перемещение поршня. Сигналы с датчиков записывались и обрабатывались компьютером.

### Основные результаты

Впервые реализованы и исследованы непрерывная спиновая и пульсирующая детонация угольно-воздушной смеси с добавкой водорода в вихревых плоскорадиальных камерах диаметром  $204$  мм и  $500$  мм. Показано, что детонация угольно-воздушной смеси может распространяться только при наличии горючей газовой добавки (в данном случае водорода), а гетерогенные реакции на поверхности частиц угля играют вторичную роль, однако обеспечивают при этом максимальное тепловыделение. Горению частиц угля способствует большая площадь контакта с газом за счет пористости, а также неровные острые края, которые нагреваются в первую очередь.

Особенности смесеобразования угольно-воздушной смеси таковы, что здесь не требуется дробления струй горючего на мелкие фрагменты – они приготовлены заранее. Необходимо обеспечить их равномерное распределение в потоке воздуха в

области распространения фронта детонационной волны.

Вихревая структура течения позволяет выполнить это требование. В камере  $204$  мм в диапазоне расходов: воздуха  $G_A = 4-1.04$  кг/с, угля с размерами частиц  $2-20$  мкм  $G_C \approx 0.3$  кг/с и водорода  $G_H = 15-12$  г/с осуществлены устойчивые режимы непрерывной спиновой детонации с одной или двумя поперечными детонационными волнами со скоростью  $D = 1.8-1.6$  км/с (рис. 2а, фронт детонации ВС), а также пульсирующей детонации с радиальными волнами и частотой  $f \approx 4.8$  кГц (рис. 2б, пучности свечения детонационной волны А и продуктов В). Найден способ подачи угольного порошка через узкие каналы путем подмешивания газа на входе в форсунку. В камере диаметром  $500$  мм расширены пределы непрерывной детонации: реализованы режимы непрерывной спиновой детонации с большим количеством поперечных волн ( $n = 5-8$ ) и движущихся со скоростями  $D = 1.8-1.5$  км/с, снижено количество подмешиваемого к углю водорода до  $2.8\%$  (по отношению к воздуху – менее  $0.65\%$ ), осуществлено сжигание более крупных частиц угля ( $\approx 60$  мкм) благодаря увеличению времени пребывания смеси в камере. Реконструирована в плоскости камеры структура волн и течения.

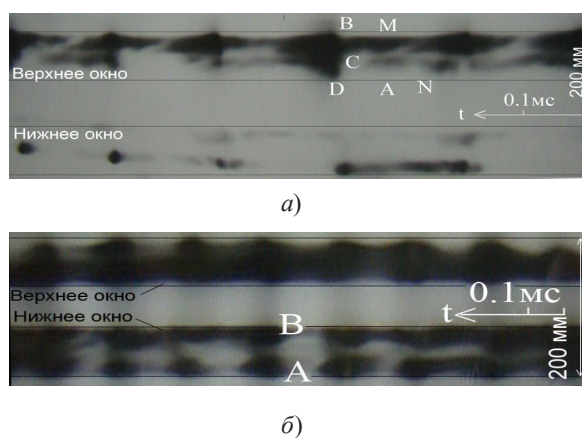


Рис. 2

Учитывая способность детонации интенсивно и с большей полнотой сжигать топливо в камерах малых габаритов, определяемых размером фронта детонационной волны, полученные экспериментальные данные имеют практическое значение, так как могут найти применение в энергетике, химической промышленности, а также способствовать снижению загрязнения окружающей среды вредными продуктами.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программ отделений РАН (проект № 2.1.4), РФФИ (грант №10-08-00225) и ИШ, проект 5770.2010.1.*

## Список литературы

1. Зельдович Я.Б. // ЖТФ. 1940. Т. 10, вып. 17. С. 1453–1461.
2. Войцеховский Б.В // ДАН СССР. 1959. Т. 129, №6. С. 1254–1256.
3. Быковский Ф.А., Митрофанов В.В., Ведерников Е.Ф. // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, №3. С. 120–131.
4. Bykovskii F.A., Zhdan S.A., Vedernikov E.F. // Journal of Propulsion and Power. 2006. Vol. 22, № 6. P. 1204–1216.
5. Быковский Ф.А. // Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. 1981. №2. С. 85–89.

## THE DETONATION OF COAL-AIR MIXTURE IN VORTEX PLANE-RADIAL CHAMBERS

*F.A. Bykovskii, Yu.A. Zholobov*

An implementation and conditions of existence of continuous burning of a coal-air mixture in rotating and/or pulsed detonation waves are presented. Activated charcoal was used in the research. Hydrogen (less than 5% of the charcoal flow rate and 1% of the air flow rate) is added to the charcoal-air mixture, which allows charcoal particles to be supplied into the chamber and the initial reaction in the gas phase to start.

*Keywords:* coal-air mixture, continuous spin detonation, pulsed detonation, plane-radial chamber, velocity of detonation, wave structure.