

УДК 536.8;536.46

НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В РЕЖИМЕ АВТОЭЖЕКЦИИ ВОЗДУХА

© 2011 г.

С.А. Ждан, Е.Ф. Ведерников

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

zhdan@hydro.nsc.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Приведены результаты экспериментального исследования непрерывной спиновой детонации водородо-воздушной смеси в проточной кольцевой камере диаметром $d_c = 306$ мм в режиме автоэжекции воздуха. Реализован режим пульсирующей детонации. Определена область существования непрерывной детонации в координатах размер щели подачи воздуха – удельный расход водорода.

Ключевые слова: эжекция воздуха, водородо-воздушная смесь, непрерывная спиновая детонация, пульсирующая детонация, проточная камера сгорания, структура течения.

Одной из альтернатив традиционному сжиганию топлив в турбулентном пламени в настоящее время является способ их сжигания в непрерывно вращающихся (спиновых) поперечных детонационных волнах (ПДВ). Анализ детонационных режимов в проточных кольцевых камерах с расширением кольцевого канала [1, 2] показал, что имеются предпосылки для осуществления непрерывной детонации без принудительной подачи окислителя в камеру сгорания. Эта потенциальная возможность подтвердилась в работе [3], где было установлено, что в проточной камере сгорания непрерывная спиновая или пульсирующая детонация горючих смесей осуществляются в режиме нестационарной эжекции кислорода. Цель данной работы – в проточной кольцевой камере осуществить и исследовать режимы непрерывной спиновой и пульсирующей детонаций ТВС в режиме автоэжекции воздуха, а также испытания в длительном режиме работы. В качестве горючего использовался водород.

Постановка экспериментов

Исследования проводились в осесимметричной кольцевой проточной камере 1 с расширением к выходу площади проходного сечения (рис. 1). Размеры камеры 1 были следующие: наружный диаметр $d_c = 306$ мм, образованный стенкой 2; длина $L_{c1} = 510$ или $L_{c2} = 395$ мм, определяемая внутренней стенкой 3, при этом длина цилиндрической части $L_z = 150$ или 35 мм; длина конической части $L_c - L_z = 360$ мм; угол при вершине внутренней конусной стенки 3

равен 30° ; минимальное расстояние основания конуса от наружной стенки $\Delta = 23$ мм.

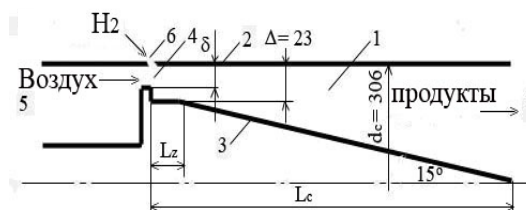


Рис. 1

Воздух в камеру 1 поступал через кольцевую щель 4 шириной δ из окружающего неограниченного пространства 5 неподвижной атмосферы с давлением $P_a \approx 1.013 \cdot 10^5$ Па и температурой $T_a \approx 293$ К. Размеры щели 4 варьировались и составляли $\delta = 3, 6, 10$ или 23 мм. Водород подавался через форсунку 6, расположенную напротив щели 4. В различных экспериментах применялись три типа форсунок: F1 – $200 \times 1 \times 1$ мм, F2 – $200 \times 0.5 \times 0.4$ мм и F3 – $400 \times 0.3 \times 0.25$ мм. Водород поступал из ресивера с начальным давлением $p_{rf0} = (10-50) \cdot 10^5$ Па. Удельные расходы водорода изменялись в диапазонах $g_f = G_f/S_c = (6.86-0.3)$ кг·м²/с. Образующаяся в начале эжекции воздуха горючая смесь поджигалась тепловым импульсом с энергией около 5 Дж. Продукты сгорания вытекали в атмосферу.

Результаты экспериментов

В зависимости от постановки эксперимента водород сгорал или в режиме обычного турбулентного пламени, или в режиме детонации. В последнем случае всегда существовал пере-

ходный процесс от горения к детонации ($t = 25 - 75$ мс), в течение которого в камере развивалась тангенциальная или продольная неустойчивость с акустическими волнами, переходящая в детонацию.

При установке щелей для подачи воздуха как малого $\delta = 3$ и 6 мм, так и большого размера (на ширину кольцевого канала камеры) $\delta = \Delta = 23$ мм форсунки F1 для обеих геометрий (L_{c1} и L_{c2}) в камере развивалось обычное турбулентное горение. Устойчивое детонационное горение развивалось только при $\delta = 10$ мм и установке форсунок F2 и F3.

Нижний предел существования детонации по расходам водорода ($g_{fmin} \approx 0.5$ кг·м²/с) получен для форсунок F2 и F3. Верхний предел по расходу водорода для форсунки F2 зависел от величины L_z . При $L_{c2} = 395$ мм получили $g_{fmin} \approx 4.4$ кг·м²/с, а для $L_{c1} = 510$ мм и $g_{fmin} \approx 3.7$ кг·м²/с. Вне пределов наблюдалось обычное горение, а внутри пределов имели место как спиновые, так и пульсирующие режимы детонации с взаимным переходом одного режима в другой, причем область существования спиновых режимов для форсунки F3 сдвинута в сторону меньших расходов водорода.

Типичные фоторегистрограммы детонации (фрагменты) при $\delta = 10$ мм приведены на рис. 2а (непрерывная спиновая детонация) и 2б (продольная пульсирующая детонация).

Давления на входе в щель для воздуха и в камере зарегистрированы практически одинаковыми во всех режимах $p_c \approx p_{c1} \approx p_{c2} \approx p_{c3} \approx (0.98 \pm 0.01) \cdot 10^5$ Па. Обнаружена стабильность скорости детонации в широком диапазоне расходов водорода. На рис. 3 изображены зависимости скорости непрерывной спиновой детонации D от удельных расходов горючего g_f для различных камер и форсунок: \blacktriangle – для L_{c1} , F2; \blacksquare – для L_{c2} , F2; \square – для L_{c2} , F3. Определена область существования непрерывной детона-

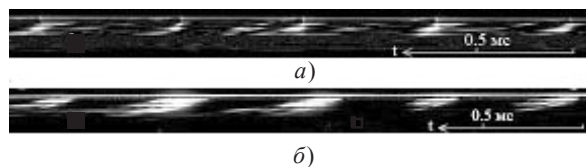


Рис. 2

ции в координатах размер щели подачи воздуха – удельный расход водорода.

Проведены испытания длительной работы камеры без охлаждения (до 6 секунд) в режиме эжекции воздуха: начальное давление водорода $p_{rf0} = 25 \cdot 10^5$ Па, форсунка F2, щель для подачи воздуха $\delta = 10$ мм и длина камеры $L_c = 395$ мм,

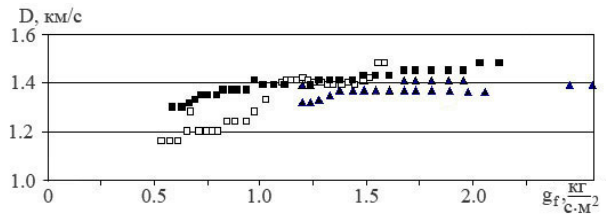


Рис. 3

$g_f = 2.75 \rightarrow 0$ кг·м²/с. Установлено, что через $t \approx 0.06$ с от момента инициирования формировался непрерывный спиновый режим детонации, который не заканчивался по крайней мере до конца фоторегистрации ($t \approx 1.45$ с после инициирования). За это время одна ПДВ совершила около 2200 устойчивых оборотов по окружности камеры, причем при уменьшении удельного расхода в 2.1 раза ($g_f = 2.55 \rightarrow 1.2$ кг·м²/с) скорость детонации оставалась практически постоянной – $D = 1.46 \pm 0.02$ км/с. При этом стенки камеры благополучно выдерживали тепловые нагрузки. Камера показала свою жизнеспособность при достаточно длительной работе (до $t \approx 6$ с), в том числе в непрерывном спиновом режиме. Реализация непрерывной спиновой детонации ТВС в режиме автоэжекции неподвижного воздуха означает возможность ее осуществления, по крайней мере, во всем дозвуковом диапазоне чисел Маха полета.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №10-01-00203) и программы ведущих научных школ НШ-5770.2010.1.

Список литературы

1. Bykovskii F.A., Zhdan S.A., Vedernikov E.F. // Journal of Propulsion and Power. 2006. V. 22, No 6. P. 1204–1216.
2. Zhdan S.A., Bykovskii F.A. Pulse and continuous detonation propulsion / Eds. G. Roy, S. Frolov. M.: TORUS PRESS, 2006. P. 181–204.
3. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. // Докл. АН. 2009. Т. 424, №1. С. 40–42.

**CONTINUOUS DETONATION OF FUEL-AIR MIXTURES IN THE REGIME
OF SELF-OSCILLATORY EJECTION OF THE AIR**

S.A. Zhdan, E.F. Vedernikov

Results of an experimental study of continuous detonation of a hydrogen-air mixture in the flow-type annular combustor 306 mm in diameter in the regime of air self-ejection are reported. The regime of pulsed detonation is also implemented. The domain of existence of continuous detonation in the coordinates «air ejection slot width versus specific flow rate of hydrogen» was found.

Keywords: air ejection, hydrogen-air mixture, continuous spin detonation, pulsed detonation, flow-type combustor, flow structure.