

НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, bykovs@hydro.nsc.ru

Приведены результаты экспериментального исследования управляемой непрерывной спиновой детонации ацетиленовоздушных и водородовоздушных смесей, а также смесей пропан — воздух — кислород и керосин — воздух — кислород в проточной цилиндрической камере диаметром 30.6 см. Рассмотрены структура течения, условия, свойства и области существования непрерывной детонации.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, топливно-воздушные смеси, камера сгорания, поперечные детонационные волны, структура течения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве альтернативы традиционному сжиганию топлив в турбулентном пламени рассматривается детонационный способ сжигания. Он позволяет интенсивно, более термодинамически выгодно [1] и стабильно производить сжигание различных топлив. Для современной науки и техники представляет интерес применение детонации в воздушно-реактивных двигателях (ВРД) и пульсирующих детонационных двигателях (ПДД). Подробный обзор современного состояния в фундаментальных и прикладных исследованиях пульсирующих детонационных двигателей и различных проектов конструкций ПДД представлен в [2]. В данной статье обсуждаются только вопросы непрерывного спинового детонационного режима сжигания топливно-воздушных смесей (ТВС) в камерах кольцевой цилиндрической геометрии. Термин «непрерывный» означает, что детонация не прекращается, пока подаются исходные топливные компоненты и отводятся продукты реакции.

Впервые непрерывные спиновые детонационные режимы сжигания ТВС с использованием как газообразных (метан, водород), так и жидких (керосин, дизельное топливо) горючих были осуществлены в камере плоскорадиальной геометрии с истечением продуктов к центру [3]. Однако подача воздуха в камеру сгорания проводилась через отверстия форсунок малого сечения с достаточно высоким гидравли-

ческим сопротивлением. С практической точки зрения интересен вариант ВРД, когда воздух подается в камеру сгорания сплошным потоком. Этот вариант для данной геометрии не испытывался. По мнению авторов, для проточного варианта двигателя типа ВРД, работающего на принципе непрерывно вращающейся детонации, наиболее подходят камеры кольцевой цилиндрической геометрии. В камере этого типа диаметром 4 и 10 см было успешно реализовано непрерывное спиновое детонационное сжигание химически активной смеси ацетилен — кислород [4, 5]. При использовании воздуха в качестве окислителя размеры этих камер оказались недостаточными, поэтому была изготовлена камера диаметром 30.6 см. Первые результаты по непрерывному спиновому сжиганию смеси ацетилен — воздух в большой камере частично опубликованы в [6]. Цель данной работы — продолжить исследования по непрерывному спиновому сжиганию смесей ацетилен — воздух и осуществить детонационное сжигание смесей водород — воздух, пропан — воздух — кислород, керосин — воздух — кислород; рассмотреть структуры детонационных волн, течения в их окрестности, условия, свойства и области существования непрерывной детонации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ДЕТОНАЦИОННАЯ КАМЕРА

Камера представляла собой осесимметричный кольцевой канал с наружным диаметром $d_c = 30.6$ см, длиной $L_c = 66.5, 50$ или 31 см, шириной канала $\Delta = 1.65, 2.3$ или

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-01-00298) и гранта Президента РФ (НШ 2073.2003.1).

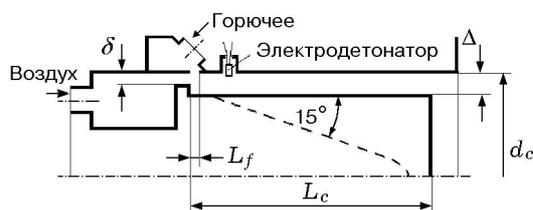


Рис. 1. Схема осесимметричной цилиндрической камеры для исследования непрерывной спиновой детонации ТВС

3.8 см (рис. 1). Часть опытов проведена в расширяющемся от $\Delta = 2.3$ см канале с углом 15° (штриховой контур) и длиной цилиндрического участка 5 или 30 см. Воздух поступал в камеру из кольцевого коллектора сечением 29.6 см^2 через кольцевую щель шириной $\delta = 0.1, 0.2, 0.3, 0.6$ или 1.0 см, а горючее — через форсунку с равномерно расположенными по окружности камеры попарно встречными каналами общей площадью сечения $S_{\delta,f} = 2.0, 0.4$ или 0.08 см^2 на расстоянии $L_f = 0.1$ см вниз по потоку от щели подачи воздуха под углом 45° . В камере с расширением кольцевого канала проведено несколько опытов при $L_f = 30$ см и длине цилиндрического участка 30 см. Газы подавались из отдельных ресиверов объемом $V_{r,a} = 79.8$ л для воздуха и $V_{r,f} = 13.3$ или 3.3 л для горючего через быстродействующие клапаны с электрическим управлением. Продукты детонации вытекали в атмосферу. Длительность процесса задавалась системой управления в диапазоне $\tau_d = 0.3 \div 0.55$ с. Детонация инициировалась электродетонатором с массой взрывчатого вещества около 0.2 г.

Процесс фотографировался через продольные окна в камере на пленку фоторегистратора с падающим барабаном [7] методом компенсации скорости, когда скорости пленки и изображения волны совпадали по направлению и были близки по величине. Для подсветки структуры волн и продуктов детонации напротив окна в начале камеры впрыскивалась струйка ацетилена. При детонации смеси H_2 — воздух к струйке ацетилена коаксиально с ней подавалась струйка кислорода. По высвеченным траекториям определялась осевая составляющая скорости потока: $v = k \operatorname{tg} \psi v_{\text{пл}}$, где $k = 37.8$ — коэффициент уменьшения изображения, ψ — угол наклона траектории к горизонтали, $v_{\text{пл}} = 50$ м/с — скорость движения

фотопленки.

Расходы газовых топливных компонентов в течение эксперимента определялись по методике, изложенной в работе [4]. Расход керосина определялся по ходу поршня расходомера, соединенного с реостатным датчиком: $G_f = k_p (\Delta L_p / \Delta t) S_p \rho_f$, где k_p — коэффициент пропорциональности между ходом поршня и сигналом регистрации ΔL_p , Δt — отрезок времени, соответствующий сигналу ΔL_p , S_p — площадь поршня, $\rho_f = 800 \text{ кг/м}^3$ — плотность керосина. Компьютерная система регистрировала сигналы с датчиков давления газов: в ресиверах, коллекторах и камере.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ацетиленовоздушная смесь

В рамках описанных выше геометрий камеры сгорания и системы подачи топливных компонентов варьировались следующие параметры подачи: расход воздуха $G_{a0} = 5.3 \div 2.12$ кг/с, расход горючего $G_{f0} = 0.3 \div 0.21$ кг/с, коэффициент избытка горючего $\phi = 1.37 \div 0.46$. Здесь и далее индекс a соответствует воздуху, f — горючему, 0 — начальному состоянию.

Во всех случаях были реализованы процессы с одной вращающейся в одном направлении волной ($n = 1$). На рис. 2 представлены фрагменты процесса с типичной спиновой или поперечной детонационной волной (ПДВ), движущейся слева направо. Течение в ее окрестности соответствует течению в системе волн. Через каждый оборот по окружности камеры ПДВ проходит мимо продольных окон длиной 4.5 см (расстояние между окнами 1.5 см). Встречных ПДВ не обнаружено. Достаточно хорошо высвечивается детонационный фронт BC вследствие попадания в него специально организованной струйки ацетилена.

Наблюдаются два характерных типа ПДВ: с фронтом химической реакции (горения), примыкающим к лидирующему ударному фронту BC (тип I, рис. 2, а) и отстающим от него пульсирующим фронтом горения $B'C'$ (тип II, рис. 2, б). Последняя структура, как правило, наблюдается при пониженном давлении в камере, соотношении компонентов, близком к пределу ($\phi = 0.7$), недостаточном качестве смешения и сильном

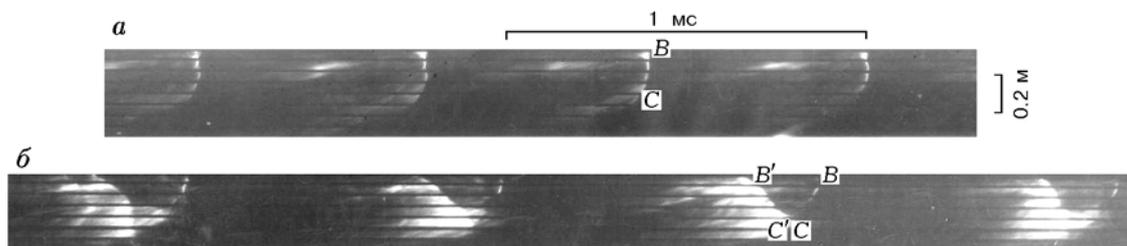


Рис. 2. Фоторегистрограмма ПДВ в камере кольцевой цилиндрической геометрии ($L_c = 66.5$ см, $\Delta = 2.3$ см, $\delta = 0.1$ см) для ацетиленовоздушной смеси:

$a - g = 146$ кг/(с·м²), $p_c = 2.2 \cdot 10^5$ Па, $\phi = 1.35$, $D = 1.5$ км/с; $b - g = 114$ кг/(с·м²), $p_c = 1.2 \cdot 10^5$ Па, $\phi = 1.3$, $D = 1.1$ км/с

влиянии ПДВ на состояние воздуха в коллекторе при дозвуковом истечении воздуха из щели ($\delta = 1$ см, $\delta/\Delta = 0.435$). Для волн типа II, несмотря на нестационарность потока за лидирующим ударным фронтом, средняя скорость волн стабильна (отклонения не более $\pm 1\%$ на смежных оборотах).

Размер ПДВ типа I при среднем давлении в камере $p_c = (1 \div 2.5) \cdot 10^5$ Па составляет $h \approx 23$ см $\approx (25 \div 60)a$, где a — характерный размер при многофронтной детонации («размер ячейки») [8]. Постоянство величины h обусловлено, по-видимому, готовностью смеси к детонации, т. е. процессами перемешивания компонентов, слабо зависящими от значений p_c . Зона свечения за фронтом BC волны типа I около 1 см, т. е. $\approx 2a$ при $p_c = 2.2 \cdot 10^5$ Па. Для волн типа II размер ПДВ больше ($h \approx 35$ см $\approx (35 \div 45)a$) и изменяется незначительно в интервале давлений $p_c = (1 \div 1.3) \cdot 10^5$ Па. Отношение h/a для ТВС оказывается в 3–5 раз больше, чем для газовых топливно-кислородных смесей (ТКС) при хорошем смешении. Отношение размера ПДВ к расстоянию между волнами $h/l = 1/4 \div 1/3$ ($l = \pi d_c$ при $n = 1$). Для ТКС $h/l = 1/10 \div 1/5$ [9]. Отличие относительной ширины детонационного фронта для ТВС вызвано следующими причинами: отсутствием (или неразвитостью) фронта горения со стороны продуктов, а также сверхзвуковой скоростью смеси в лабораторной системе координат перед фронтом ПДВ. Измеренная осевая скорость смеси, проходящей через нижнюю часть фронта, составляет около 600 м/с и приближается к максимально возможной $v_{\max} = [2/(\gamma - 1)]^{0.5} c_0$, где γ — показатель изоэнтропы, c_0 — скорость звука воздуха в ресивере. Этой скорости соответствует число Маха $M = 2.8$. Увеличение ско-

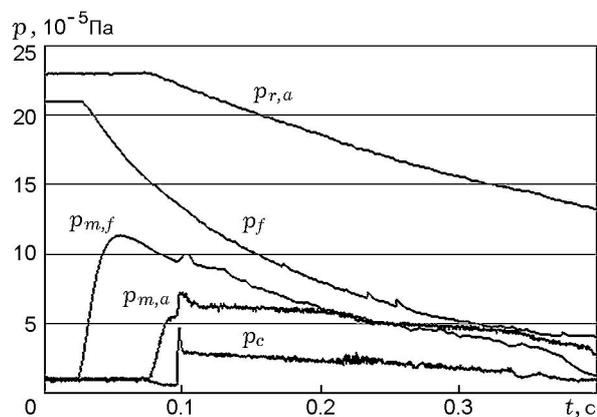


Рис. 3. Осциллограммы давления при непрерывной вращающейся детонации ацетиленовоздушной смеси ($L_c = 50$ см, $\Delta = 1.65$ см, $\delta = 0.2$ см; $D = 1.51 \div 0.99$ км/с, $n = 1$)

рости натекающей смеси вниз по потоку приводит к искривлению детонационного фронта и его трансформации в нижней части в косую детонационную волну.

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы давления в ресиверах воздуха ($p_{r,a}$) и ацетилена (p_f), коллекторах воздуха ($p_{m,a}$) и ацетилена ($p_{m,f}$), а также в камере сгорания (p_c) при непрерывной вращающейся детонации ацетиленовоздушной смеси. Поступление ацетилена в камеру происходило раньше, чем воздуха. Поэтому инициирование детонационного процесса синхронизировалось с повышением давления в коллекторе воздуха. Избыточное содержание ацетилена в камере в момент инициирования способствовало реализации детонационного режима, началу и окончанию которого соответствуют резкий подъем и уменьшение давления в камере. Отметим, что площадь сечения подводящего воздуха трубопрово-

δ , см	δ/Δ	D , км/с	p_m , 10^5 Па	p_c , 10^5 Па	p_m/p_c
0.1	0.043	$1.1 \div 1.27 \div 1.23$	$6.67 \div 3.4$	$1.2 \div 1.0$	$5.66 \div 3.4$
0.2	0.084	$1.48 \div 1.43$	$3.6 \div 1.82$	$1.27 \div 1.0$	$2.83 \div 1.82$
0.3	0.13	$1.35 \div 1.27$	$2.7 \div 1.34$	$1.3 \div 1.0$	$2.03 \div 1.34$
1.0	0.435	$0.89 \div 0.7$, неустойчивая	$1.53 \div 1.12$	$1.22 \div 1.06$	$1.25 \div 1.6$

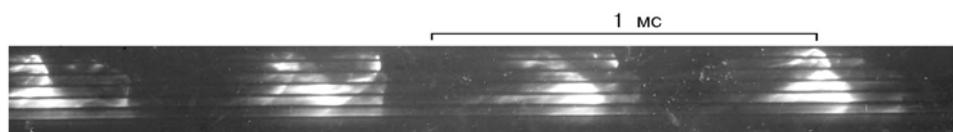


Рис. 4. Фоторегистрограмма ПДВ в камере с расширением кольцевого канала ($L_c = 36$ см, $\Delta = 2.3$ см, $\delta = 0.1$ см) для ацетиленовоздушной смеси ($g = 112$ кг/(с·м²), $p_c = 1.2 \cdot 10^5$ Па, $\phi = 1.3$, $D = 1.23$ км/с)

да (8.04 см²) была меньше, чем площадь сечения всех использованных кольцевых щелей подачи воздуха в камеру. Поэтому расход воздуха определялся сечением трубопровода, и для обеспечения необходимого расхода использовались повышенные давления $p_{r,a}$ в ресивере.

Обращает на себя внимание относительно малое давление в камере сгорания p_c , измеренное на расстоянии 1.5 см от щели подачи воздуха. Значения p_c можно увеличить за счет увеличения расхода компонентов (увеличением сечения кольцевой щели и форсунки, повышением давления подачи или тем и другим способами одновременно), а также за счет уменьшения площади сечения кольцевого канала камеры сгорания или заужения его на выходе. В практическом отношении предпочтительно иметь давление в камере p_c достаточно высоким для большей степени расширения продуктов, а давление в коллекторе $p_{m,a}$ — достаточно низким, так как при этом снижаются потери в компрессоре для турбореактивного ВРД или число Маха набегающего потока в случае прямоточного ВРД.

Основные параметры детонационных режимов при $L_c = 66.5$ см, $\Delta = 2.3$ см, давлениях подачи и расхода воздуха $p_{a0} = 15 \cdot 10^5$ Па и $G_{a0} = 2.12$ кг/с, а ацетилена $p_{f0} = 10.9 \times 10^5$ Па и $G_{f0} = 0.214$ кг/с представлены в таблице в диапазонах текущих расходов $G_a = 1.98 \div 1.03$ кг/с, $G_f = 0.187 \div 0.1$ кг/с, удельного расхода смеси $g = 106 \div 55$ кг/(с·м²) и $\phi = 1.26 \div 1.29$. Видно, что более сильные ПДВ

(с большей скоростью детонации) реализуются при истечении воздуха в камеру сгорания через щели шириной $\delta = 0.2$ и 0.3 см. Качество волн практически не нарушается даже при дозвуковом истечении воздуха. Его подача через малый ($\delta = 0.1$ см) и большой ($\delta = 1.0$ см) зазоры, по-видимому, не обеспечивает достаточной степени перемешивания. Истечение воздуха через зазор $\delta = 1.0$ см дозвуковое на всем протяжении процесса. Сравнение скоростей детонации в этом режиме с режимом при $\delta = 0.3$ см, где в основном преобладает также дозвуковое истечение, прямо указывает на недостаточность перемешивания компонентов в зоне вращения фронта ПДВ при $\delta = 1.0$ см. Согласно данным таблицы рабочая частота процесса находится в диапазоне $f = 0.8 \div 1.54$ кГц.

Увеличение расхода компонентов смеси по отношению к вышеприведенным данным пропорционально повышало давление в камере и расширяло область существования волн первой структуры. При этом скорость ПДВ, как правило, также возрастала (максимально до 1.58 км/с).

В вариантах $L_c = 66.5$ см, $\Delta = 3.8$ см и $L_c = 31$ см, $\Delta = 2.3$ см для приведенных выше расходов компонентов и их соотношений всегда реализовывались волны типа II. В первом случае это связано с уменьшением удельного расхода смеси и, как следствие, с уменьшением давления в камере, а во втором, по-видимому, с проникновением волн разрежения от среза канала в зону реакции за лидирующим ударным фронтом ПДВ.

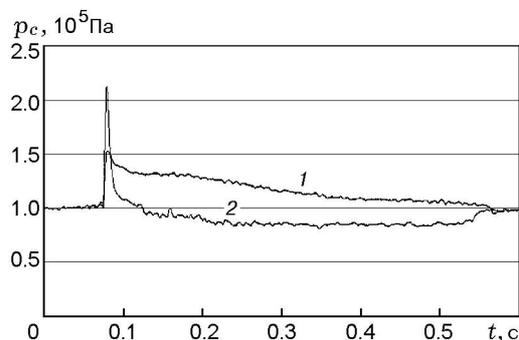


Рис. 5. Осциллограммы давления при непрерывной вращающейся детонации ацетиленовоздушной смеси в камере кольцевой цилиндрической геометрии (1) ($L_c = 66.5$ см, $\Delta = 2.3$ см) и в камере с расширением (2) ($\delta = 0.1$ см, $G_{a0} = 2.12$ кг/с, $G_{f0} = 0.207$ кг/с)

В камере с расширением канала ($L_c = 36$ см) наблюдалось как снижение давления в камере, так и проникновение волн разрежения в зону реакции, поэтому всегда (в пределах приведенных выше расходов) реализовывались волны типа II (рис. 4). Характерной особенностью течения в камере этой геометрии является пониженное статическое давление в камере по сравнению с рассмотренными камерами кольцевой цилиндрической геометрии, которое может быть даже ниже атмосферного (рис. 5), поскольку реализуется течение с перерасширением. Причем давление сохранялось практически постоянным в течение всего эксперимента, несмотря на то, что расходы компонентов уменьшались вдвое. Эти особенности непрерывной детонации наблюдались и для ацетиленокислородной смеси в камере диаметром 10 см с расширением канала [5]. Повышение расходов компонентов в 1.5 раза увеличивало давление в камере и приближало его к атмосферному. Опыты с большими расходами компонентов для камеры с расширением не проводились. Наблюдаемое поведение статического давления в камере с расширением канала допускает возможность реализации работы камеры в режиме эжекции воздуха из атмосферы.

Удлинение цилиндрической части камеры с расширением канала на 30 см и перенос на это же расстояние места подачи ацетилена ($L_f = 30$ см) обеспечивало сплошной дозвуковой поток воздуха по всему сечению канала $\Delta = 2.3$ см. Однако смесеобразование компонентов при этом сильно затруднялось и не образовывалось критического слоя для детонации. В ре-

зультате наблюдалось обычное турбулентное горение, растянутое по длине камеры. В камере диаметром 10 см для смеси ацетилен — кислород в такой же постановке удавалось обеспечить устойчивый детонационный спиновый режим при $\Delta = 0.5$ см [4]. Это сравнение показывает, что детонация ТВС в формирующемся после прохождения через коллектор сплошном дозвуковом потоке воздуха в принципе возможна, но для смеси ацетилен — воздух реализация ПДВ оказалась неосуществимой, так как не хватало длины кольцевого канала (диаметра камеры). При лучшем смешении компонентов (водород — воздух) все же удалось реализовать спиновую детонацию и в этой камере (см. ниже).

Водородовоздушная смесь

Опыты проводились для той же геометрии камер и системы подачи, что и в случае детонационного сжигания ацетиленовоздушной смеси. Варьируемые параметры подачи были следующие: $G_{a0} = 1.6 \div 4$ кг/с, $G_{f0} = 0.07 \div 0.28$ кг/с, $\phi = 0.4 \div 3.34$. В течение эксперимента расходы компонентов уменьшались, но расход водорода уменьшался быстрее, чем воздуха. В результате происходило постепенное обеднение смеси горючим.

Типичный фрагмент фоторегистрограммы детонационного процесса (примерно 1/8 ее часть) представлен на рис. 6. Отметим исключительную стабильность скорости ПДВ и устойчивость их структуры в диапазоне давлений в камере $p_c = (1.8 \div 1.2) \cdot 10^5$ Па. Из фрагмента видно, что время переходного процесса от момента инициирования до появления устойчивых ПДВ достаточно короткое — $3 \div 4$ мс, что составляет 3–4 оборота волны вокруг кольцевого канала.

На рис. 7 приведены значения скорости ПДВ D и частоты f в зависимости от удельного расхода смеси g при $\delta = 0.2$ см ($\delta/\Delta = 0.087$) и сверхкритическом истечении воздуха из щели и водорода из форсунки ($S_{\delta,f} = 0.4$ см²), соответствующие рис. 6. Данные дополнены результатами опыта, дублирующего по начальным параметрам рассматриваемый эксперимент. Длительность дублирующего опыта была такой, что удалось наблюдать процесс практически до полного затухания ПДВ. Для того чтобы полностью определить момент затухания ПДВ, проводились опыты при меньших

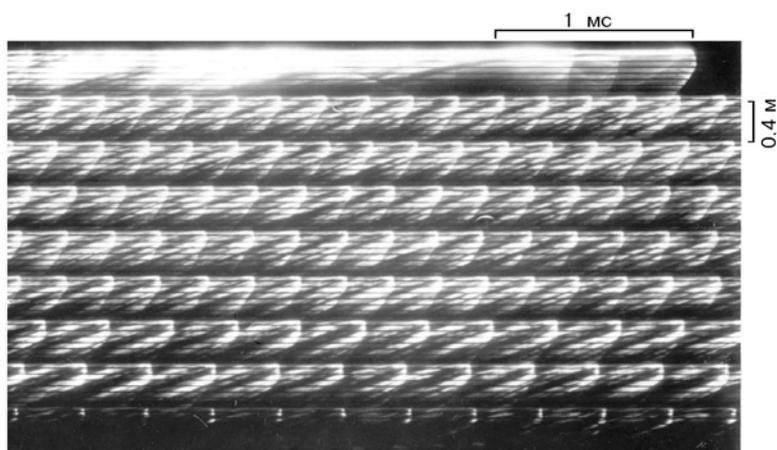


Рис. 6. Фоторегистрограмма ПДВ в водородовоздушной смеси ($\delta = 0.2$ см, $\delta/\Delta = 0.087$, $n = 3 \rightarrow 2$)

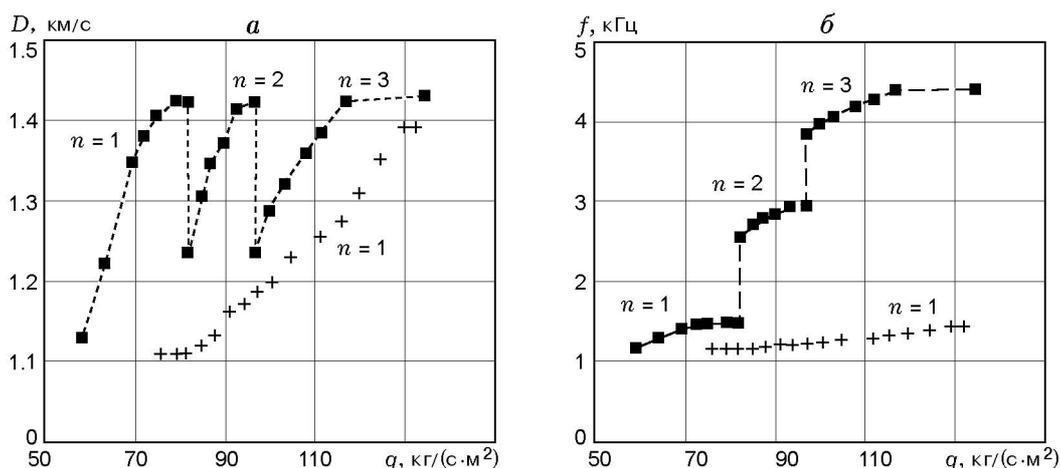


Рис. 7. Скорость непрерывной детонации (*a*) и частота вращения волн (*б*) в зависимости от удельного расхода водородовоздушной смеси:

■ — $\delta = 0.2$ см, $\delta/\Delta = 0.087$; + — $\delta = 0.6$ см, $\delta/\Delta = 0.26$

расходах воздуха и водорода. Параметры спиновой детонации менялись в диапазонах: $D = 1.43 \div 1.1$ км/с; $n = 3 \div 1$; $f = 4.46 \div 1.15$ кГц; $\phi = 1.94 \div 0.8$. В исследованном диапазоне расходов смеси сначала в камере реализуются три ПДВ, скорость которых монотонно уменьшается от 1.43 до 1.23 км/с с уменьшением удельного расхода g . При $g = 97$ кг/(с·м²) происходит перестройка течения и в камере начинают распространяться две ПДВ, скорость которых с уменьшением g также монотонно уменьшается от 1.42 до 1.23 км/с. При $g = 82$ кг/(с·м²) снова происходит перестройка течения и в камере продолжает распространяться одна ПДВ. По

данным других опытов при уменьшении расхода до $g = 46$ кг/(с·м²) наблюдался срыв режима спиновой детонации с ПДВ и переход на обычное горение. При этом соотношение компонентов было близко к стехиометрии, давление в камере 1.03 атм, а в коллекторе воздуха — 2 атм, скорость детонации 1.17 км/с.

Следует отметить, что изменение количества волн происходит очень быстро — на 1–2 расстояниях между волнами. Причина перестройки состоит в том, что с уменьшением давления в камере увеличивается критический размер слоя горючей смеси, необходимый для детонации (h_*). При достижении $p_c =$

$1.33 \cdot 10^5$ Па и $\phi = 1.3$ на три образовавшихся в начале процесса ПДВ не хватает втекающей через систему подачи горючей смеси для формирования существующих волн размера h_* , поэтому одна из трех волн затухает. В результате временной промежуток между волнами увеличивается и, соответственно, образуется более широкий слой смеси ($h > h_*$). Когда остается только одна ПДВ, возможность для перестройки пропадает и волна монотонно ослабляется, вырождаясь в акустическую (иногда в продольную детонационную с большим периодом пульсации). И наконец, процесс переходит в стадию турбулентного горения с протяженным вниз по потоку фронтом.

При докритическом истечении воздуха из щели $\delta = 0.6$ см ($\delta/\Delta = 0.26$) в камере реализуется только одна ПДВ (см. рис. 7), скорость которой монотонно уменьшается от 1.39 км/с ($g = 132$ кг/(с·м²)) до 1.11 км/с ($g = 76$ кг/(с·м²)) с уменьшением удельного расхода ТВС.

В диапазоне указанных выше расходов компонентов при использовании форсунки горючего с площадью сечения $S_{\delta,f} = 2$ см² и щели шириной $\delta = 0.3$ см ($\delta/\Delta = 0.13$) определены значения коэффициента избытка горючего, которые можно считать предельными для существования непрерывной спиновой детонации: верхний — $\phi = 2.7$, нижний $\phi = 0.65$. Вне этих пределов по ϕ реализовывались неустойчивые детонационные режимы с преобладанием обычного турбулентного горения. При этом удельные расходы топливной смеси находились в интервале, приведенном на рис. 7. С увеличением ширины щели диапазон устойчивых детонационных режимов по ϕ сужается.

Ширина фронта ПДВ в водородовоздушной смеси $h \approx 24/n$ [см] при $n = 1 \div 3$. Сопоставление структуры фронта детонации исследованных ТВС показывает, что при $\delta = 0.2$ см ($\delta/\Delta = 0.087$) и максимальных удельных расходах число волн водородовоздушной смеси (см. рис. 6) втрое больше, чем в ацетиленовоздушной смеси. Известно, что для заранее приготовленных стехиометрических смесей размер ячейки a для ацетиленовоздушной смеси примерно в 1.5 раза меньше, чем для водородовоздушной смеси [10]. Этот неожиданный результат связан, по нашему мнению, с преобладающим влиянием физических процессов смешения компонентов над химическими свойствами смесей, в частности, более интенсивным пе-

ремешиванием компонентов водород — воздух вследствие большей разности скоростей струй на контактных границах, определяющих интенсивность и масштаб турбулентности. Подтверждением данного предположения являются результаты опытов при $\delta/\Delta = 0.26$ (см. рис. 7) и $\delta/\Delta = 0.435$, когда реализовывались только одноволновые детонационные режимы.

В опытах в камере с расширяющимся сечением канала и $L_f = 0.1$ см при тех же расходах, что и для ацетиленовоздушной смеси, развивались достаточно сильные ПДВ типа I, имеющие скорости в течение процесса $D = 1.52 \div 1.28$ км/с при $n = 1$. Детонационный режим с ПДВ существовал и в случае удлинения цилиндрической части канала до $L_f = 30$ см. Однако в последнем случае скорости детонации были меньше — $D = 1.14$ км/с при $n = 1$. Эти опыты подтверждают предположение о лучшем качестве смешения водородовоздушной смеси по сравнению с ацетиленовоздушной. Кроме того, последний опыт уже на ТВС показывает возможность существования спиновой детонации в формирующемся после прохождения через коллектор сплошном дозвуковом потоке окислителя, как это было показано для ТКС в работе [4]. Давление в камере, как и в случае ацетиленовоздушной смеси, в определенном диапазоне расходов было ниже атмосферного.

При варьировании относительной ширины щели подачи воздуха в диапазоне $\delta/\Delta = 0.043 \div 0.435$ получена область существования непрерывной спиновой детонации исследованных ТВС в зависимости от определяющих параметров: давления в коллекторе воздуха p_m , давления в камере p_c и противодействия p_a . На рис. 8 в координатах $\pi_{m,c} = p_m/p_c$ и $\pi_{m,a} = p_m/p_a$ представлены экспериментальные результаты для режимов с ПДВ. Так же как и для ТКС [5], область существования ПДВ в цилиндрической камере для ТВС располагается вправо от прямой $p_c = p_a$ (сплошная линия) в областях I и III ($p_c > p_a$), а в камере с расширением канала заходит и в область II ($p_c < p_a$). Области I и II соответствуют звуковому истечению воздуха через щель, а область III — дозвуковому истечению ($1 < \pi_{m,c} < 1.89$). Наиболее устойчивыми являются режимы при повышенных значениях $\pi_{m,c}$ и $\pi_{m,a}$. С уменьшением перепада давления $\pi_{m,c}$ вращающаяся детонация реализуется в области III, а при одновременном уменьшении параметров $\pi_{m,c}$ и

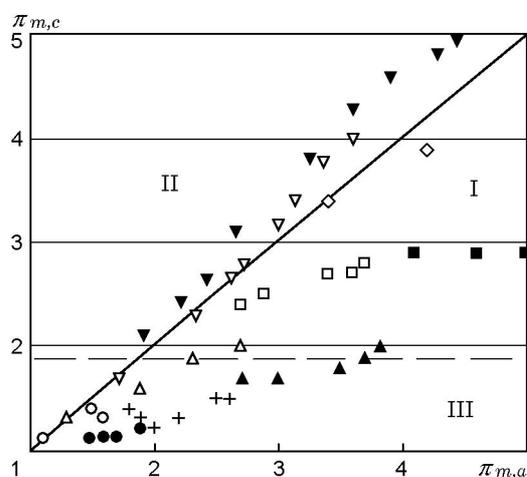


Рис. 8. Область существования непрерывной спиновой детонации в ТВС. Кольцевая цилиндрическая камера — C_2H_2 — воздух:

$\delta/\Delta = 0.043$ (\diamond), 0.087 (\square), 0.13 (\triangle), 0.435 (\circ); H_2 — воздух: $\delta/\Delta = 0.087$ (\blacksquare), 0.13 (\blacktriangle), 0.26 ($+$), 0.435 (\bullet); камера с расширением канала — C_2H_2 — воздух (∇); H_2 — воздух (\blacktriangledown), $\delta = 0.2$ см, $\delta/\Delta = 0.087$

$\pi_{m,a}$ детонация стремится к пределу существования — в нижний левый «угол». Предел по детонации ацетиленовоздушной и водородовоздушной смесей располагается в «угле» с вершиной $\pi_{m,c} \approx 1.1$ и $\pi_{m,a} \approx 1.03$. В окрестности вершины «угла» усиливается выгорание смеси в турбулентном фронте пламени и детонационные волны ослабевают, вырождаясь в акустические. Увеличение расхода компонентов путем повышения давления подачи при неизменной геометрии камеры благоприятно для осуществления режима непрерывной спиновой детонации, так как с точностью до величины потерь в системе подачи отношение $\pi_{m,c}$ не изменяется, а отношение $\pi_{m,a}$ растет, уменьшая влияние противодействия на процесс в камере.

Пропано- и керосиновоздушные смеси

Пропано- и керосиновоздушные смеси считаются химически малоактивными для прямого инициирования в них детонации. Непрерывную спиновую детонацию этих смесей с помощью трех детонаторов возбудить не удалось. Осуществлялся режим обычного турбулентного горения на выходе из камеры. Известно, что для прямого инициирования заранее приготовленной газовой смеси пропана с воздухом необходима энергия не менее 340 кДж или 85 г тротила [10], а для инициирования керосино-

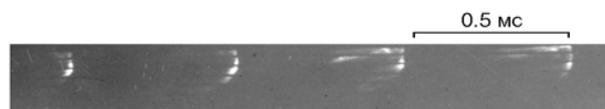


Рис. 9. Фоторегистрограмма ПДВ в пропановоздушной смеси, обогащенной кислородом:

$[O_2] : [N_2] = 1 : 1$; $L_c = 66.5$ см, $\Delta = 2.3$ см, $\delta = 0.2$ см; $G_{a+O} = 1.75$ кг/с, $G_f = 0.24$ кг/с, $\phi = 1.0$, $p_c = 1.5 \cdot 10^5$ Па, $D = 1.6$ км/с, $n = 1$



Рис. 10. Фоторегистрограмма ПДВ в керосиновоздушной смеси, обогащенной кислородом:

$[O_2] : [N_2] = 1 : 1$; $L_c = 50$ см, $\Delta = 1.65$ см, $\delta = 0.2$ см; $G_{a+O} = 6.3$ кг/с, $G_f = 0.9$ кг/с, $\phi = 0.96$, $p_c = 6.0 \cdot 10^5$ Па, $D = 1.5$ км/с, $n = 2$

воздушной смеси минимальная энергия должна быть еще больше и ее величина сильно зависит от диаметра исходных капель горючего [11, 12]. В нашем случае энергия инициирования зависит также и от качества дробления струй керосина в потоке воздуха и, вероятно, для прямого возбуждения детонации потребовалось бы несколько сотен граммов тротила, что недопустимо для стационарной установки.

В обеих смесях удалось осуществить вращающуюся детонацию только при обогащении воздуха кислородом в массовом соотношении $[O_2] : [N_2] = 1 : 1$, используя детонатор с 0.2 г ВВ. Типичная фоторегистрограмма непрерывной детонации смеси пропан — воздух — кислород представлена на рис. 9, а двухфазной смеси керосин — воздух — кислород — на рис. 10. В практическом отношении приемлемо использование чистого воздуха. Поэтому проблема инициирования вращающейся детонации ТВС на базе пропана и керосина остается актуальной и требует дальнейших исследований.

Выводы

1. В проточной цилиндрической камере диаметром 30.6 см при отдельной подаче топливных компонентов впервые реализован управляемый режим непрерывной спиновой детонации с ПДВ в ацетиленовоздушной и водородовоздушной смесях.

2. Выявлены два характерных типа ПДВ: с фронтом химической реакции (горения), при-

мыкающим к лидирующему ударному фронту, и отстающим от него пульсирующим фронтом горения. Последняя структура, как правило, наблюдается при пониженном давлении в камере, соотношении компонентов, близком к пределу, недостаточном качестве смешения и сильном влиянии ПДВ на состояние воздуха в коллекторе при дозвуковом истечении воздуха из щели. Увеличение расхода компонентов смеси повышает давление в камере и расширяет область существования волн первой структуры. При этом скорость ПДВ, а также их количество, как правило, также возрастают.

3. Определена область существования непрерывной спиновой детонации ТВС в зависимости от определяющих параметров: давления в коллекторе воздуха, давления в камере и противодавления. Для цилиндрической камеры достигнут предел существования непрерывной спиновой детонации ацетиленовоздушной и водородовоздушной смесей: $\pi_{m,c} \approx 1.1$ и $\pi_{m,a} \approx 1.03$. Вблизи предела появляются нерегулярность ПДВ и их ослабление, а также усиливается выгорание смеси в турбулентном фронте пламени.

4. При хорошем смесеобразовании наблюдаются исключительная стабильность скорости ПДВ и устойчивость их структуры (не считая моментов смены количества детонационных волн) в широком диапазоне соотношений топливных компонентов и исследованном диапазоне давлений в камере.

5. Непрерывную спиновую детонацию в смесях пропан — воздух и керосин — воздух удалось реализовать в данной камере только при обогащении воздуха кислородом в массовом соотношении $[O_2] : [N_2] = 1 : 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ. 1940. Т. 10, вып. 17. С. 1453–1461.
2. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective // Progress in Energy and Combust. Sci. 2004. V. 30. P. 545–672.
3. Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф. Непрерывное детонационное сжигание топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 3. С. 120–131.
4. Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная детонация дозвукового потока топлива // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 3. С. 93–104.
5. 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.
6. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Спиновая детонация топливно-воздушной смеси в цилиндрической камере // Докл. АН. 2005. Т. 400, № 3. С. 338–340.
7. Быковский Ф. А. Высокоскоростной ждущий фоторегистратор // Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии. 1981. № 2. С. 85–89.
8. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчян М. Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
9. Быковский Ф. А., Митрофанов В. В. Детонационное сжигание газовой смеси в цилиндрической камере // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 5. С. 107–117.
10. Васильев А. А., Митрофанов В. В., Топчян М. Е. Детонационные волны в газах // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 109–131.
11. Alekseev V. I., Dorofeev S. B., et al. Experimental study of large-scale unconfined fuel spray detonations // Dynamic Aspects of Explosion Phenomena / A. L. Kuhl, J. C. Leyer, A. A. Borisov, W. A. Sirignano (Eds). (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 154). Washington, AIAA, 1993. P. 95–104.
12. Papavassiliou J., Makris A., Knystautas R., et al. Measurements of cellular structure in spray detonation // Ibid. P. 148–169.

Поступила в редакцию 22/VI 2005 г.