

УДК 534.222.2,544.454.3

НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ СМЕСЕЙ СИНТЕЗ-ГАЗ — ВОЗДУХ

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

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

В проточной кольцевой цилиндрической камере впервые реализованы режимы непрерывного детонационного сжигания смесей синтез-газ — воздух в поперечных (спиновых) детонационных волнах. Исследованы смеси оксида углерода и водорода в объемных пропорциях $[CO]/[H_2] = 1/1, 1/2$ и $1/3$ в широком диапазоне коэффициентов избытка горючего. Максимальные скорости детонационных волн 1.57 км/с наблюдались для смеси горючего $CO + 3H_2$ с воздухом при небольшом (около 15 %) избытке горючего. Определены пределы существования непрерывной детонации по коэффициенту избытка горючего и минимальной величине удельного расхода смеси. Построена область реализованных режимов детонации в координатах «коэффициент избытка горючего — удельный расход смеси».

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, синтез-газ, воздух, поперечные детонационные волны, камера сгорания, система подачи топлива.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся работы по созданию научных основ детонационных двигателей, в которых топливо непрерывно сжигается в бегущей поперечной детонационной волне [1] (схема Войцеховского [2]). Практический интерес представляет реализация непрерывной спиновой детонации (НСД) топливно-воздушных смесей (ТВС) в условиях, близких таковым в воздушно-реактивных двигателях (ВРД). Недавно в проточных кольцевых камерах были реализованы и исследованы режимы НСД со скоростями $1 \div 1.4$ км/с в ацетиленовоздушной [3] и водородовоздушной [4] смесях. Однако попытки получить в проточной кольцевой камере диаметром $d_c = 306$ мм НСД пропановоздушной и керосиновоздушной смесей не увенчались успехом [4], поскольку диаметр камеры оказался меньше критического диаметра ($d_c < d_{cr}$) для реализации непрерывного детонационного процесса. Уменьшение критического диаметра НСД возможно при осуществлении предварительной подготовки топлива. Хорошо известен способ предварительной конверсии керосина до синтез-газа [5], состоящего из смеси газовых компонентов водо-

рода (H_2) и монооксида углерода (CO). В настоящее время разработан ряд промышленных технологий получения синтез-газа путем взаимодействия углерода с водяным паром ($C + H_2O = CO + H_2$), конверсии метана при высоких давлениях и температурах в присутствии никелевых катализаторов ($CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$), неполного термического окисления углеводородов ($C_nH_{2n+2} + (1/2)nO_2 = nCO + (n + 1)H_2$) [5]. Последний способ применим к любому углеводородному топливу, в том числе и к керосину. Соотношение $[CO]/[H_2]$ существенно зависит от применяемого способа получения синтез-газа. При газификации угля и частичном окислении углеводородов оно близко к $1/1$, тогда как при частичном окислении метана ($CH_4 + (1/2)O_2 = CO + 2H_2$) соотношение $[CO]/[H_2]$ составляет $1/2$ [5].

Цель настоящей работы — реализация и определение условий существования непрерывной спиновой детонации смесей синтез-газ — воздух при молярных соотношениях $[CO]/[H_2]$ $1/1, 1/2$ и $1/3$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И КАМЕРА СГОРАНИЯ

Схема установки представлена на рис. 1. Наружный диаметр кольцевой цилиндрической камеры сгорания $d_c = 306$ мм, ее длина $L_c = 570$ мм, зазор $\Delta = 16.5$ мм (площадь поперечного сечения канала $S_\Delta = 150$ см²). Воздух в камеру сгорания поступал из ресивера 4 объе-

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 26.3 и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ 247.2012.1).

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

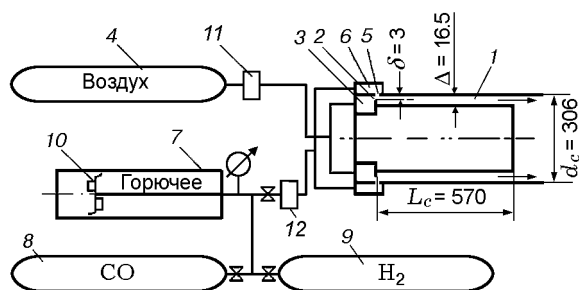


Рис. 1. Схема установки:

1 — камера сгорания, 2 — кольцевая щель, 3, 6 — кольцевой коллектор, 4, 7 — ресивер, 5 — форсунка, 8, 9 — баллоны, 10 — сегнерово колесо, 11, 12 — клапаны

мом $V_{r,a} = 43.3$ л по кольцевому коллектору 3 через кольцевую щель 2 шириной $\delta = 3$ мм, а горючее — из ресивера 7 объемом $V_{r,f} = 13.3$ л по кольцевому коллектору 6 через форсунку 5. Форсунка состояла из 400 отверстий с поперечным сечением 1×0.5 мм, направленных попарно под углом 90° , а также под углом 45° к оси камеры. Смесь СО и H_2 готовили непосредственно в ресивере 7. Использовали газы с содержанием примесей не более 0.5 % (по объему). Вначале заполняли ресивер оксидом углерода, затем добавляли водород (из баллонов 8 и 9 соответственно). Для перемешивания газов в ресивере использовали сегнерово колесо 10 с лопастями на обоих плечах. Водород создавал реактивные струи и раскручивал колесо, а лопасти вызывали движение смеси в осевом направлении. Тем самым достигалось интенсивное перемешивание газов. Для контроля качества смесеобразования СО и H_2 в ресивере горючего определяли характерное время диффузии в ресивере объемов водорода, имеющих характерный размер x (диаметр трубок в сегнеровом колесе): $\Delta t = x^2/D_0$, где D_0 — коэффициент взаимной диффузии газов СО и H_2 . Подставляя значения $x = 4$ мм и $D_0 = 0.6$ см²/с, получаем $\Delta t \approx 0.25$ с. Для равномерного распределения газа по ресиверу использовалась винтовая крыльчатка на оси сегнерова колеса 10. Время образования смеси (от начала ее приготовления до подачи в камеру сгорания) составляло не менее 5 мин, поэтому горючие компоненты хорошо перемешивались по всему объему камеры. Независимым критерием хорошего перемешивания горючих компонентов служил коэффициент расхода c [6], который в разных опытах для данной смеси сохранял свое значе-

ние. Важно отметить, что при вертикальном расположении ресивера и его наполнении через тракт подачи без устройства для перемешивания не удавалось создать необходимую смесь. Водород «всплывал» в ресивере и после открытия клапана в системе подачи первым вытекал из ресивера. При этом коэффициент расхода в начале опыта вдвое превышал его значения при хорошем перемешивании газов. Для уменьшения влияния разности плотностей газов на перемешивание (устранения «всплывания» водорода) ресивер 7 располагали в горизонтальном положении. Воздух и горючее подавали в камеру через клапаны 11 и 12, время срабатывания которых задавали программным устройством на пульте управления.

Начальные расходы воздуха и горючего варьировали в пределах $G_{a0} = 3.74 \div 1.38$ кг/с и $G_{f0} = 0.51 \div 0.15$ кг/с при начальных давлениях в ресиверах $p_{r,a0} = (29 \div 10.6) \cdot 10^5$ Па и $p_{r,f0} = (60 \div 27) \cdot 10^5$ Па соответственно. Начальные значения коэффициента избытка горючего $\phi_0 = 0.53 \div 1.9$. За время регистрации процесса на пленку $t = 0.45$ с расходы воздуха уменьшались примерно в 3.4 раза, а горючего — вдвое. Поэтому в ходе эксперимента коэффициент избытка горючего ϕ повышался в 1.5 \div 1.7 раза. Удельные расходы смеси в разных опытах варьировали в пределах $g_\Sigma = (G_a + G_f)/S_\Delta = (260 \div 34)$ кг/(с·м²), где G_a и G_f — текущие расходы компонентов. Расход газов определяли по уменьшению давления в ресиверах воздуха $p_{r,a}$ и горючего $p_{r,f}$ [6] с погрешностью не более ± 2 %. Соответственно погрешность вычисления удельных расходов и коэффициентов избытка горючего не выходила за пределы этой погрешности. Инициирование процесса, его фоторегистрацию, измерение текущего давления и обработку сигналов с датчиков проводили аналогично [7]. Добавим, что для измерения давления использовали сертифицированные датчики фирмы «Wika» класса точности 1 %, а погрешность измерения скоростей детонационных волн и течения продуктов не превышала ± 1.5 %. Истечение продуктов происходило в атмосферу.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В области указанных выше параметров подачи компонентов смеси впервые были осуществлены режимы непрерывного сжигания смесей синтез-газ — воздух в поперечных (спи-

новых) детонационных волнах (ПДВ). Использовались три состава синтез-газа: а) $\text{CO} + \text{H}_2$; б) $\text{CO} + 2\text{H}_2$; в) $\text{CO} + 3\text{H}_2$.

На рис. 2 приведен фрагмент типичной фоторегистрограммы непрерывного детонационного сгорания смеси $\text{CO} + 2\text{H}_2 + \text{воздух}$ начиная от инициирования (яркая вспышка на 1-й дорожке) до окончания фиксирования его на пленку (последняя, 14-я дорожка, дорожки 5–12 не показаны). Длительность процесса вдоль одной дорожки составляет 1.63 мс, между дорожками — 33.3 мс. Поперечные детонационные волны движутся слева направо — сначала две волны по окружности камеры ($n = 2$), затем в промежутке между 6-й и 7-й дорожками происходит смена режима на одноволновый ($n = 1$). За время регистрации уменьшаются удельный расход ТВС $g_{\Sigma} = 218 \rightarrow 74 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и давление в камере $p_{c1} = 2.5 \rightarrow 1.3 \cdot 10^5 \text{ Па}$, а коэффициент избытка горючего растет — $\phi = 0.89 \rightarrow 1.36$. При этом скорость ПДВ падает ($n = 2, D = 1.37 \rightarrow 1.27 \text{ км}/\text{с}$), а с переходом на одноволновый режим ($n = 2 \rightarrow 1$) резко возрастает и затем монотонно уменьшается к концу процесса — $D = 1.52 \rightarrow 1.28 \text{ км}/\text{с}$. В камере реализуются в основном ПДВ, имеющие структуру типа I [4], когда фронт горения сли-

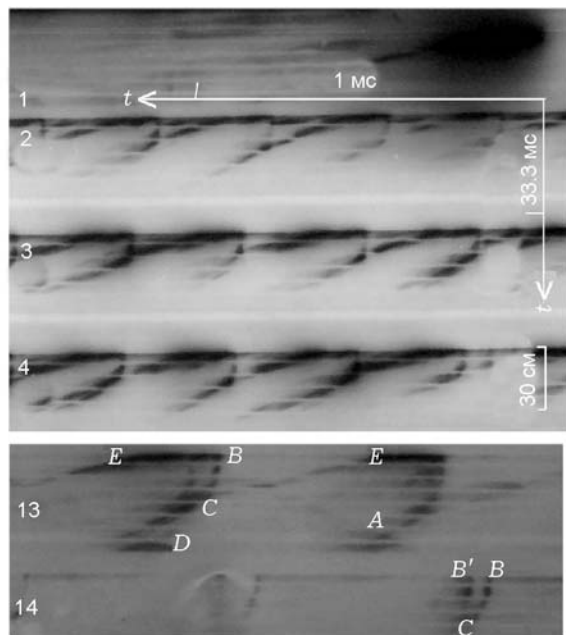


Рис. 2. Фрагмент типичной фоторегистрограммы непрерывного детонационного сгорания смеси $\text{CO} + 2\text{H}_2 + \text{воздух}$:

дорожки 2–4 — $n = 2$, дорожки 13, 14 — $n = 1$

вается с ведущим ударным фронтом с образованием детонационного фронта BC (см. рис. 2, 13-я дорожка). Здесь CD — ударная волна в продуктах (шлейф), примыкающая к детонационному фронту, EC — контактный разрыв (фронт горения) между свежей смесью и продуктами. В конце процесса статическое давление в камере мало отличается от атмосферного ($p_{c1} \approx 1.3 \cdot 10^5 \text{ Па}$), поэтому просматривается и ударная волна AB , заходящая в камеру и тормозящая сверхзвуковой поток продуктов. Поскольку она заходит в область смесеобразования, это влияет на начальные условия перед ПДВ (в данном опыте снижает скорость непрерывной детонации). На пределах существования НСД появляются также волны типа II [4], когда фронт горения $B'C$ отстает от ударного BC (см. рис. 2, 14-я дорожка). Размер фронта BC (размер ПДВ) составляет $h \approx 13 \text{ см}$ при $n = 2$ и $h \approx 21 \text{ см}$ при $n = 1$, а отношение размера ПДВ к расстоянию между волнами $h/l = 1/5 \div 1/4$.

На рис. 3,а приведены осциллограммы давления в ресиверах воздуха и горючего, а на рис. 3,б — в соответствующих коллекторах и в камере (в ее начале и конце). Резкий подъем давления в камере соответствует моменту инициирования детонации. Статическое давление на выходе из камеры p_{c5} близко к атмосферному, проходит через минимум и возрастает в конце процесса — признак проникновения скачка уплотнения внутрь камеры. Проявляется влияние процесса в камере на давление в коллекторе воздуха: после инициирования оно возрастает. Кратковременно возрастает и давление в коллекторе горючего, вызванное инициированием скопившейся смеси во всем объеме камеры.

Основные параметры детонационных режимов исследованных ТВС вблизи стехиометрии для составов синтез-газа $\text{CO} + \text{H}_2$, $\text{CO} + 2\text{H}_2$, $\text{CO} + 3\text{H}_2$ представлены в табл. 1. Видно, что с ростом доли водорода в составе синтез-газа формируются более сильные ПДВ (с большей скоростью непрерывной детонации) и расширяется диапазон удельных расходов смеси для реализации двухволновых режимов. Для всех составов синтез-газа увеличение расхода смеси пропорционально повышает давление в камере, а рабочая частота вращения ПДВ находится в диапазоне $f = 1.27 \div 2.85 \text{ кГц}$.

На рис. 4 приведены зависимости скорости непрерывной спиновой детонации D от удель-

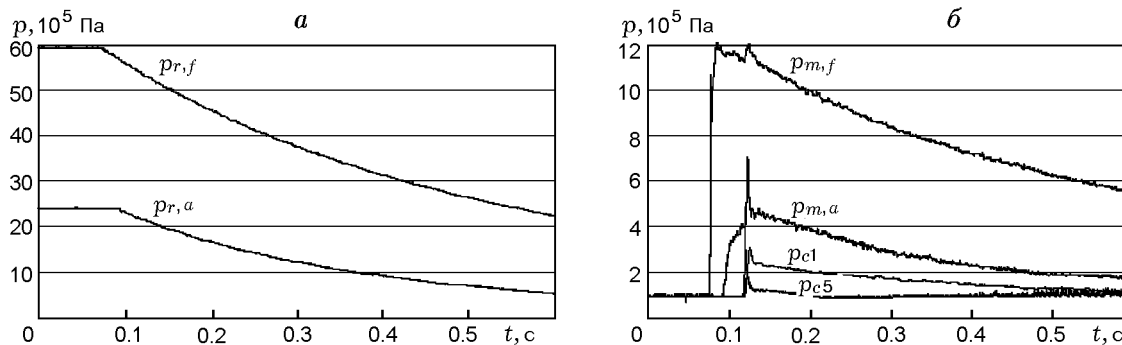


Рис. 3. Осциллограммы давления:

a — в ресивере воздуха ($p_{r,a}$) и горючего ($p_{r,f}$); *б* — в коллекторах воздуха ($p_{m,a}$), горючего ($p_{m,f}$), в камере (p_{c1}) на расстоянии 15 мм от переднего торца, на выходе из камеры (p_{c5}); осциллограммы соответствуют процессу, изображенному на фоторегистрограмме рис. 2

Таблица 1

Горючее	$p_{m,a}, 10^5 \text{ Па}$	$g_{\Sigma}, \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	ϕ	$D, \text{ км}/\text{с}$	n	$p_{c1}, 10^5 \text{ Па}$
CO + H ₂	4 → 3	200 → 144	0.9 → 1.06	*	2 ↔ 1	2.3 → 1.84
	3 → 1.6	144 → 67.5	1.06 → 1.55	1.4 → 1.22	1	1.84 → 1.19
CO + 2H ₂	4.8 → 3.2	218 → 144	0.89 → 1.05	1.37 → 1.27	2	2.5 → 1.83
	3.2 → 1.87	144 → 74	1.05 → 1.36	1.52 → 1.28	1	1.83 → 1.3
CO + 3H ₂	5.1 → 2.5	240 → 115	0.9 → 1.15	1.37 → 1.22	2	2.7 → 1.64
	2.5 → 1.8	115 → 75	1.15 → 1.32	1.57 → 1.32	1	1.64 → 1.35

Примечание. * — нестабильный по скорости и числу волн режим НСД.

ного расхода смеси g_{Σ} . Точки 1–3 взяты из одного опыта с каждой конкретной горючей смесью (см. табл. 1).

Для состава синтез-газа CO + 3H₂ (точки 3) в исследованном диапазоне расходов смеси в камере сначала реализуются две ПДВ ($n = 2$), скорость которых уменьшается от 1.37 до 1.22 км/с с уменьшением расхода g_{Σ} . При $g_{\Sigma} = 115 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ происходит перестройка

течения и в камере начинает распространяться одна ПДВ, скорость которой с уменьшением g_{Σ} монотонно падает от 1.57 до 1.32 км/с при $g_{\Sigma} = 75 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. При этом соотношение компонентов близко к значению $\phi = 1.32$, давление в камере 1.35 атм, а в коллекторе воздуха — 1.8 атм. Заметим, что в отличие от НСД водородовоздушных смесей [4], в которых перестройка течения при изменении числа волн происходит достаточно быстро, в течение 1 ÷ 2 мс, в синтез-газе конкуренция между ПДВ 1 и 2 длится довольно долго: $\Delta t \approx 50 \text{ мс}$.

Для состава синтез-газа CO + 2H₂ (точки 2) в камере сначала также реализуются две ПДВ, скорость которых монотонно уменьшается от 1.37 до 1.27 км/с. При $g_{\Sigma} \approx 144 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ в результате перестройки течения начинает распространяться одна ПДВ, скорость которой с уменьшением g_{Σ} также монотонно уменьшается от 1.52 до 1.28 км/с при $g_{\Sigma} = 74 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi \approx 1.36$.

Для синтез-газа состава CO + H₂ (точки 1) вначале наблюдаются неустойчивые по количеству волн режимы НСД ($n = 2 \leftrightarrow 1$ — конкуренция одной и двух ПДВ). И лишь при

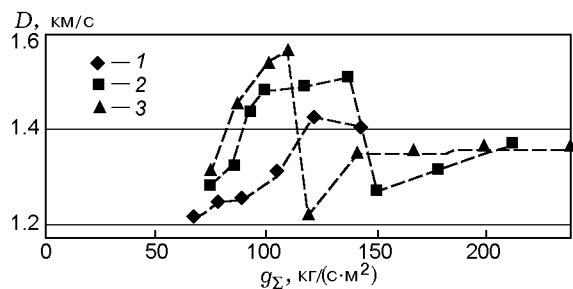


Рис. 4. Скорости ПДВ в зависимости от удельного расхода смеси g_{Σ} :

1 — CO + H₂, 2 — CO + 2H₂, 3 — CO + 3H₂; кривые соответствуют процессам, параметры которых приведены в табл. 1

$\phi = 1.06$ и $g_{\Sigma} = 144 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ устанавливается стабильный режим НСД с одной ПДВ ($n = 1$), скорость которой монотонно уменьшается от 1.4 до 1.22 км/с при $g_{\Sigma} = 67.5 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi \approx 1.55$.

Таким образом, при одинаковых значениях удельных расходов ТВС синтез-газ — воздух уменьшение доли водорода в составе синтез-газа однозначно приводит к уменьшению скорости ПДВ и их числа.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Реализация режимов НСД смесей синтез-газ — воздух и измерение скоростей ПДВ позволяют сравнить полученные экспериментальные данные с классической детонацией Чепмена — Жуге (ЧЖ) для смесей синтез-газ — воздух. Однако знакомство с литературой показало, что надежных экспериментальных данных по скорости классической детонации ЧЖ для синтез-газа, т. е. двухкомпонентного топлива монооксид углерода — водород, в широком диапазоне объемной концентрации водорода α в этой смеси практически нет. Существует единственная работа [8], в которой представлены экспериментальные и расчетные данные по скоростям детонации ЧЖ ($D_{\text{СЖ}}$) и размерам детонационных ячеек λ (см. также [9]) в стехиометрических ТВС вида $(1 - \alpha)\text{CO} + \alpha\text{H}_2$ — воздух при $\alpha \leq 1/3$ и стандартных условиях ($p_0 = 1 \text{ атм}$ и $T_0 = 300 \text{ К}$) (табл. 2). Существуют также термодинамические расчеты [10] скорости детонации ЧЖ и газодинамических параметров в плоскости ЧЖ для системы синтез-газ — воздух при $\alpha = 0.5$ [10] и $\alpha = 1$ [11]. Их результаты также внесены в табл. 2.

По данным расчетов [8, 10, 11] построена аппроксимационная зависимость скорости де-

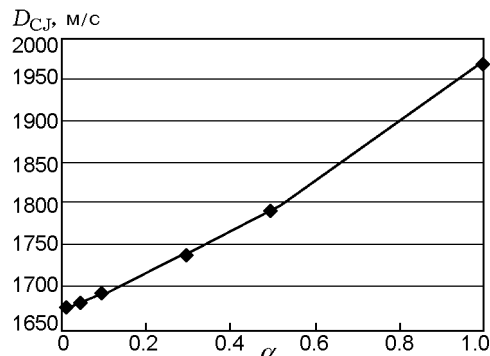


Рис. 5. Аппроксимационная зависимость скорости детонации Чепмена — Жуге от концентрации водорода в горючем газе $(1 - \alpha)\text{CO} + \alpha\text{H}_2$ [8, 10, 11]

тонации ЧЖ от объемного содержания водорода в стехиометрической ТВС $(1 - \alpha)\text{CO} + \alpha\text{H}_2$ — воздух. Она представлена на рис. 5. Из графика следует, что скорости детонации ЧЖ для стехиометрических смесей $\text{CO} + 2\text{H}_2$ — воздух ($\alpha = 2/3$) и $\text{CO} + 3\text{H}_2$ — воздух ($\alpha = 3/4$) приблизительно равны: $D = 1850$ и 1880 м/с соответственно.

При НСД и стехиометрическом соотношении окислитель — горючее ($\phi = 1$) в кольцевой камере диаметром $d_c = 306 \text{ мм}$ для синтез-газа трех исследованных составов реализованы следующие режимы: при $\alpha = 1/2$ — одна волна ($n = 1$) со скоростью $D = 1.27 \div 1.32 \text{ км/с}$, $D/D_{\text{СЖ}} = 0.71 \div 0.74$; при $\alpha = 2/3$ — две волны ($n = 2$) со скоростью $D = 1.27 \div 1.33 \text{ км/с}$, $D/D_{\text{СЖ}} = 0.69 \div 0.72$; при $\alpha = 3/4$ — одна волна ($n = 1$) со скоростью $D = 1.32 \text{ км/с}$, $D/D_{\text{СЖ}} = 0.7$ или две волны ($n = 2$) со скоростью $D = 1.37 \text{ км/с}$, $D/D_{\text{СЖ}} = 0.73$. Различие скоростей волн и их количеств (для последнего случая) обусловлено разными начальными условиями процесса, а также разными удельными расходами топлива. По отношению реализуемых скоростей НСД к скоростям ЧЖ видно, что скорости ПДВ всегда меньше скорости детонации ЧЖ, но больше скорости звука в продуктах и находятся в интервале $D/D_{\text{СЖ}} = 0.69 \div 0.74$.

Изменение скорости НСД в зависимости от коэффициента избытка горючего приведено на рис. 6. При одинаковых числе волн и значениях ϕ скорости волн НСД возрастают с повышением содержания водорода в горючей смеси. Видно, что максимальная скорость волн НСД реализуется при небольшом избытке го-

Таблица 2

α	$D_{\text{СЖ}}, \text{ м/с}$	$\lambda, \text{ мм}$	Источник
0.02	1673.9	100.3	[8]
0.05	1679.9	48.4	
0.1	1690.7	32	
0.3	1739.2	16.9	
0	1670	—	[10–12]
0.5	1793.1	—	
1	1966	10.9 ÷ 15	

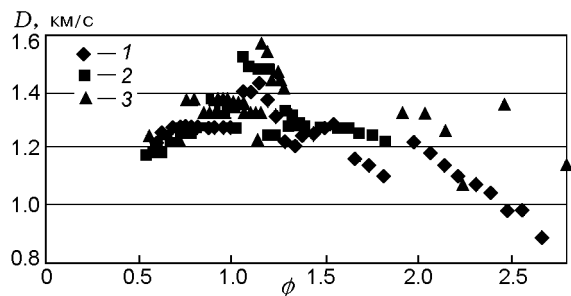


Рис. 6. Скорости ПДВ в зависимости от коэффициента избытка горючего:

1 — CO + H₂, 2 — CO + 2H₂, 3 — CO + 3H₂

рючего ($\phi \approx 1.15$). При одноволновом режиме ($n = 1$) достигаются максимальные скорости ПДВ: $D = 1.4, 1.49$ и 1.57 км/с для смесей синтез-газа CO + H₂, CO + 2H₂ и CO + 3H₂ соответственно. Если принять, что при стандартных условиях и $\phi = 1.15$ скорость классической детонации увеличивается на $1.5 \div 3$ % (по аналогии с горючими смесями $(1 - \alpha)CH_4 + \alpha H_2$ и $(1 - \alpha)C_3H_8 + \alpha H_2$ [13]), то по отношению к идеальной детонации ЧЖ скорости НСД этих смесей составят $0.81 \div 0.85$. На пределах существования НСД по коэффициенту избытка горючего ($\phi_{\min} = 0.53, \phi_{\max} = 2.7$) реализуется одна ПДВ, которая вне этих пределов становится неустойчивой и затем исчезает. Переходы от двухволнового режима к одноволновому ($n = 2 \rightarrow 1$) всегда сопровождаются повышением скорости детонации (например, для смеси 1 при $\phi = 1.8 \rightarrow 1.9$ или для смеси 3 при $\phi = 2.35 \rightarrow 2.46$, см. рис. 6). Подобная картина наблюдалась в случае водородовоздушных смесей [4], а еще раньше — для ацетиленокислородных смесей [2, 14].

Представляет интерес область существования НСД смеси синтез-газ — воздух по коэффициенту избытка горючего и минимальному удельному расходу смеси. Экспериментальные данные, полученные в используемой конструкции камеры сгорания и системы подачи смесевых компонентов (форсунок горючего, щели подачи воздуха и их расположения), приведены на рис. 7.

Наиболее широкую область реализации непрерывного детонационного процесса имеет смесь при $\alpha = 3/4$ (CO + 3H₂), наименьшую — при $\alpha = 1/2$ (CO + H₂). Это вполне объяснимо, поскольку пределы детонации водородовоздушной смеси гораздо шире, чем смеси оксида углерода с воздухом [13]. По коэффици-

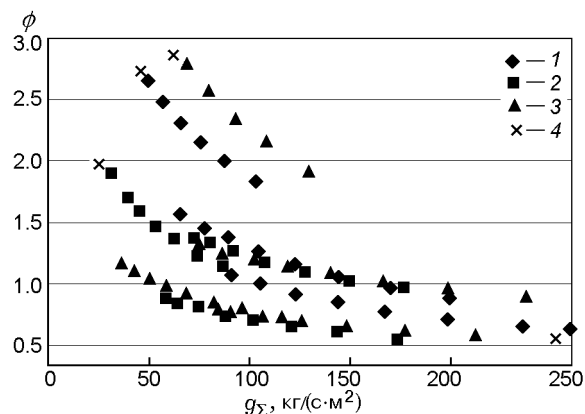


Рис. 7. Область реализованных режимов НСД:

1 — CO + H₂, 2 — CO + 2H₂, 3 — CO + 3H₂, 4 — срыв ПДВ

енту избытка горючего существуют ограничения, о которых упоминалось выше: $\phi_{\min} = 0.53, \phi_{\max} = 2.7$. Эти граничные значения примерно одинаковы для всех смесей исследованного состава синтез-газа. Найдена граница по минимальной величине удельного расхода смеси — $g_{\Sigma \min} \approx 34$ кг/(с·м²) при $\phi = 1.8$. При приближении к пределам по ϕ граничные значения $g_{\Sigma \min}$ отодвигаются вправо в сторону повышения g_{Σ} . Неисследованной осталась область ϕ, g_{Σ} в правом верхнем углу рис. 7, а также при больших значениях g_{Σ} , но выше ϕ_{\min} . По-видимому, она входит в область существования непрерывной спиновой детонации, так как детонационная способность смеси возрастает с увеличением удельного расхода смесевых компонентов (давления в камере $p_{c,i}$). Не исключено, что с ростом g_{Σ} значение ϕ_{\max} будет расти, а ϕ_{\min} — уменьшаться.

Высота детонационного фронта h зависит от состава смеси, количества ПДВ и положения относительно пределов по ϕ и g_{Σ} . При $n = 2$ для всех смесей $h = 12 \div 15$ см, причем меньшие значения соответствуют большему содержанию водорода в горючей смеси. При $n = 1$ и вблизи стехиометрии $h = 18 \div 24$ см. Корреляция по содержанию водорода оставалась той же: смеси CO + 3H₂ — воздух соответствуют меньшие значения h . При стремлении к пределам по ϕ и g_{Σ} размеры волн для всех смесей приближаются к $h \approx 30$ см. Высота фронта ПДВ исследованных смесей близка к его величине для водородовоздушных смесей — $h \approx 24/n$. Это вполне согласуется с размером ячеек-

ки λ стехиометрической смеси $0.7\text{CO} + 0.3\text{N}_2 +$ воздух, которая близка к размеру ячейки водородовоздушной смеси при стехиометрии и нормальных условиях — $\lambda \approx 1.5$ см (см. табл. 2). С учетом того, что $\lambda \sim p_c^\nu$, где $\nu \approx 1$ [2], высота фронта ПДВ будет равна $h \approx (20 \div 25)\lambda$ при двухволновом режиме ($n = 2$) и $h \approx (20 \div 30)\lambda$ при одноволновом режиме ($n = 1$). Этими данными можно пользоваться при оценке минимального диаметра камеры сгорания при заданных удельных расходах смеси синтез-газ — воздух. Ширину зоны яркого свечения за ПДВ можно считать зоной реакции. Как для $n = 2$, так и для $n = 1$ она не превышает $10 \div 15$ мм, т. е. в $10 \div 20$ раз меньше высоты поперечного фронта h .

Получена оценка скорости холодной смеси v_{mix} на границе с продуктами и на подходе к ПДВ. Ее вычисляли по развертке движения светящихся продуктов вдоль продольных окон в камере (фотопленка двигалась перпендикулярно длинной стороне окон) — $v_{mix} = k \operatorname{tg}(\beta)v_p$, где $k = 43.7$ — коэффициент уменьшения изображения, β — угол наклона траектории светящихся частиц на пленке к горизонтали, $v_p = 37.7$ м/с — скорость движения пленки фоторегистратора. Для двухволнового ($n = 2$) и одноволнового ($n = 1$) режимов $\beta = 10 \div 12^\circ$, поэтому $v_{mix} = 290 \div 350$ м/с. Эти значения близки к скорости звука в детонирующей смеси.

ВЫВОДЫ

1. В проточной кольцевой цилиндрической камере впервые реализованы режимы непрерывного детонационного сжигания смесей синтез-газ — воздух в поперечных (спиновых) детонационных волнах.

2. Для данной геометрии камеры и системы подачи смесевых компонентов определены пределы существования непрерывной детонации по коэффициенту избытка горючего (минимальные и максимальные значения) и по удельному расходу смеси (минимальные значения). Построена область реализации детонационных режимов в координатах этих переменных.

3. Максимальные скорости детонационных волн наблюдались при незначительном избытке горючего ($\approx 15\%$), а также для смесей горючего с наибольшим содержанием водорода.

4. Структура поперечных детонационных волн и высота фронтов для исследованных смесей близки к определенным ранее для водородовоздушных смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F.** Continuous spin detonations // *J. Propul. Power.* — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1204–1216.
2. **Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е.** Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
3. **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.
4. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация топливно-воздушных смесей // *Физика горения и взрыва.* — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 107–115.
5. **Катализ в C_1 -химии** / под ред. В. Кайма. — Л.: Химия, 1987.
6. **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.
7. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация водородовоздушной смеси с добавкой воздуха в продукты и зону смесеобразования // *Физика горения и взрыва.* — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 60–68.
8. **Austin J. M., Shepherd J. E.** Detonations in hydrocarbon fuel blends // *California Inst. of Technology. Rep. FM 99-6.* — Pasadena, California, 2000. — P. 1–53.
9. **Austin J. M., Shepherd J. E.** Detonations in hydrocarbon fuel blends // *Combust. Flame.* — 2003. — V. 132. — P. 73–90.
10. **Васильев А. А.** Детонационные свойства синтез-газа // *Физика горения и взрыва.* — 2007. — Т. 43, № 6. — С. 90–96.
11. **Николаев Ю. А., Топчиян М. Е.** Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // *Физика горения и взрыва.* — 1977. — Т. 13, № 3. — С. 393–404.
12. **Vasil'ev A. A.** Cell size as the main geometric parameter of a multifront detonation wave // *J. Propul. Power.* — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1245–1260.

13. **Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б.** Водород: параметры горения и взрыва. — М.: Физматлит, 2008.
14. **Михайлов В. В., Топчиян М. Е.** К исследованиям непрерывной детонации в кольцевом канале // Физика горения и взрыва. — 1965. — Т. 1, № 4. — С. 20–23.

Поступила в редакцию 6/IV 2012 г.
