

УДК 534.222.2,544.454.3

НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ СМЕСЕЙ МЕТАН/ВОДОРОД — ВОЗДУХ В КОЛЬЦЕВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

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

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

Режимы непрерывной детонации топливовоздушных смесей метан/водород — воздух в спиновых и встречных поперечных детонационных волнах впервые реализованы в проточной кольцевой цилиндрической камере сгорания диаметром 503 мм. Исследовано двухкомпонентное горючее метан/водород с массовыми долями H_2 в горючем $1/9 \div 1/2$ в диапазоне удельных расходов смеси $64 \div 1310$ кг/(с·м²) при коэффициенте избытка горючего $\phi = 0.78 \div 1.56$. В смесях метан/водород — воздух с горючим двух составов $CH_4 + 8H_2$ и $CH_4 + 4H_2$ реализованы одноволновые и двухволновые режимы непрерывной спиновой детонации с частотой вращения поперечных детонационных волн $0.56 \div 1.66$ кГц при $\phi = 0.78 \div 1.02$, а для составов $CH_4 + 2H_2$ и $CH_4 + 1.5H_2$ — непрерывная многофронтная детонация с двумя встречными поперечными детонационными волнами с частотой $0.86 \div 1.34$ кГц при $\phi = 1.0 \div 1.23$. В смеси $CH_4 + H_2 +$ воздух наблюдали как горение в камере, так и непрерывную спиновую детонацию вне камеры сгорания с поперечными детонационными волнами, вращающимися с частотой $1.01 \div 1.1$ кГц. Получены нижние пределы непрерывной детонации по удельному расходу смеси 64, 100, 200 и 790 кг/(с·м²) для горючего составов $CH_4 + 8H_2$, $CH_4 + 4H_2$, $CH_4 + 2H_2$, $CH_4 + 1.5H_2$ соответственно, а также по массовой доле водорода в составе горючего метан/водород ≈ 0.16 . Обнаружено нарушение регулярности структуры волн непрерывной детонации, а также их скорости с уменьшением доли водорода в двухкомпонентном горючем.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, непрерывная многофронтная детонация, метан, водород, воздух, поперечные детонационные волны, кольцевая камера сгорания, система подачи топлива, фоторегистрация, структура течения.

DOI 10.15372/FGV20180411

ВВЕДЕНИЕ

Результаты изучения непрерывной спиновой детонации (НСД) по схеме Б. В. Войцеховского [1], вызывающие в последнее время интерес во всем мире, обобщены в книге [2]. Обзор современного состояния экспериментальных исследований НСД в проточных кольцевых камерах сгорания (вариант воздушно-реактивного двигателя) для ряда топливовоздушных смесей (ТВС) представлен в [3]. В плоскорадиальной камере типа жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) диаметром $d_{c1} = 204$ мм первые успешные опыты по реализации НСД в смеси метан — воздух проведены в [4]. Цель настоящей работы — реализация и исследование в проточной кольцевой цилиндрической камере диаметром 503 мм (ДК-500) НСД

самой трудно детонирующей смеси метан — воздух при добавке водорода.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Кольцевая детонационная камера ДК-500 [3] представляла собой коаксиальный канал с внешним диаметром $d_c = 503$ мм, длиной внутреннего цилиндра $L_c = 540$ мм и зазором $\Delta = 18$ мм. Площадь проходного сечения канала камеры $S_\Delta = \pi(d_c - \Delta)\Delta = 274.1$ см². Воздух в камеру ДК-500 поступал по кольцевому коллектору с тангенциальной подачей через кольцевую щель шириной $\delta = 3.5$ мм (площадь проходного сечения щели $S_\delta = \pi(d_c - \delta)\delta = 54.9$ см²). Коэффициент расширения канала камеры ДК-500 $K_S = S_\Delta/S_\delta = 5.0$. Горючее поступало через форсунку, имеющую 600 отверстий поперечного сечения 0.35×1.45 мм, направленных попарно под углом 90° , а также под углом 45° к оси камеры. Горючее — смесь метан/водород пяти составов: $CH_4 + 8H_2$ ($m_H = 1/2$), $CH_4 + 4H_2$ ($m_H = 1/3$),

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-01-00102а).

$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2$ ($m_{\text{H}} = 1/5$), $\text{CH}_4 + 1.5\text{H}_2$ ($m_{\text{H}} = 3/19$) и $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ ($m_{\text{H}} = 1/9$). Здесь m_{H} — массовая доля водорода в двухкомпонентном горючем. Начальное давление в двух ресиверах воздуха объемом $V_{r,a} = 87.3$ л составляло $p_{r,a0} = (30 \div 60) \cdot 10^5$ Па, а в ресивере горючего объемом $V_{r,f} = 24$ л оно равнялось $p_{r,f0} = (60 \div 80) \cdot 10^5$ Па. Текущее давление воздуха в ресиверах $p_{r,a}$ за время эксперимента (0.8 с) уменьшалось примерно в 20 раз, а в ресивере горючего $p_{r,f}$ — от 7.5 до 14.6 раза (большее снижение для горючего с большим содержанием водорода). Начальный расход воздуха в ТВС изменялся в диапазоне $G_{a0} = 18.5 \div 34.5$ кг/с, горючего — $G_{f0} = 0.75 \div 1.4$ кг/с, а их текущие расходы G_a и G_f уменьшались примерно пропорционально давлению в ресиверах. Начальные коэффициенты избытка горючего составляли $\phi_0 = 0.78 \div 1.56$. Текущие значения ϕ уменьшались примерно на 15 % для смеси $\text{CH}_4 + 8\text{H}_2$, были практически постоянны для состава $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2$ и увеличивались в два раза для смеси $\text{CH}_4 + \text{H}_2$. Для выравнивания текущих значений ϕ в последней смеси в ряде опытов использовался ресивер горючего объемом $V_{r,f} = 13$ л. Определялись удельные расходы воздуха через кольцевую щель $g_\delta = G_a/S_\delta$ и смеси через поперечное сечение камеры сгорания $g_\Sigma = (G_a + G_f)/S_\Delta$.

Процесс инициировался пережиганием электротокотом полоски алюминиевой фольги (энерговыведение ≈ 5 Дж) в струе ацетиленокислородной смеси, факел которой поджигал ТВС после подачи горючего в камеру ДК-500. Фотосъемка процесса велась высокоскоростной камерой Photron Fastcam SA1.1 675K-M3 через продольные окна, каждое длиной 93 мм и шириной 20 мм. В контрольных опытах для точного определения скорости и числа поперечных детонационных волн (ПДВ) применялся метод развертки светящихся объектов, движущихся поперек $1/3$ длины второго окна. Измерялось статическое давление в коллекторах воздуха $p_{m,a}$ и горючего $p_{m,f}$, в начале камеры p_{c1} (в 15 мм от торца) и в конце p_{c3} , а также на срезе камеры — полное давление p_{c30} . Для смеси $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ дополнительно измерялось статическое давление p_{c4} за пределами кольцевого канала на расстоянии 60 мм. Обработку кадров фотосъемки, измерение текущих давлений и обработку сигналов с датчиков проводили аналогично

работе [3]. Истечение продуктов происходило в атмосферу с давлением $p_a = 10^5$ Па.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В камере ДК-500 при $K_S = 5.0$ в области указанных выше параметров подачи компонентов ТВС (G_a, G_f) были исследованы возможности реализации непрерывной детонации с ПДВ в смеси метан/водород — воздух с горючим пяти составов: $\text{CH}_4 + 8\text{H}_2$, $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2$, $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2$, $\text{CH}_4 + 1.5\text{H}_2$ и $\text{CH}_4 + \text{H}_2$.

2.1. Непрерывная спиновая детонация с ПДВ

Горючее $\text{CH}_4 + 8\text{H}_2$ ($m_{\text{H}} = 1/2$). НСД в этой смеси существовала в широком диапазоне удельных расходов воздуха через кольцевую щель: $g_\delta = 3450 \rightarrow 310$ кг/(с·м²) при $\phi = 1.02 \rightarrow 0.78$. В диапазоне $g_\delta = 3450 \rightarrow 760$ кг/(с·м²) при $\phi = 1.02 \rightarrow 0.96$ наблюдали режимы с двумя спиновыми ПДВ и их частотой вращения $f = 1.66 \rightarrow 1.32$ кГц (скорость детонации относительно наружной стенки камеры $D = 1.3 \rightarrow 1.04$ км/с), а при $g_\delta = 760 \rightarrow 310$ кг/(с·м²) и $\phi = 0.96 \rightarrow 0.78$ НСД была нерегулярной, с переменной числа волн n от двух к одной и наоборот ($n = 2 \leftrightarrow 1$). При $n = 2$ диапазон частот составлял $f = 1.1 \div 1.4$ кГц ($D = 0.86 \div 1.1$ км/с), а при $n = 1$ — $f = 0.65 \div 0.87$ кГц ($D = 1.02 \div 1.37$ км/с).

Характерная фоторегистрограмма НСД (фрагмент), снятая через продольные окна, приведена на рис. 1,а. Поскольку линейный масштаб фоторегистрограммы по оси времени искажен (зависит от частоты регистрируемых фотокамерой кадров), то на рис. 1,б дополнительно приведен фрагмент этой фоторегистрограммы с согласованием масштабов по оси и окружности камеры (буквенные обозначения соответствуют одним и тем же волнам). В контрольном опыте с сохранением параметров подачи компонентов смеси для точного определения скорости и числа ПДВ применялся метод развертки светящихся объектов. Развертка движения этих волн ($x-t$ -диаграмма) представлена на рис. 1,в. Время между смежными ПДВ уже не зависит от скорости съемки, однако с ее увеличением улучшается качество фоторазвертки (растет число пикселей по ширине окна). Из рис. 1,в видно, что все ПДВ движутся в одном направлении. Фрагмент фоторегистрограммы на рис. 1,б так совмещен с разверткой

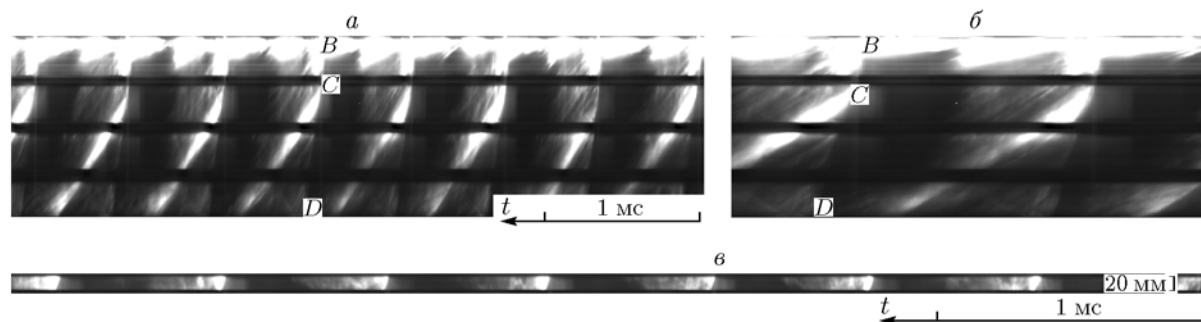


Рис. 1. Фрагменты фоторегистрограммы НСД (*a*, *б*) и развертка движения ПДВ (*в*) в смеси $\text{CH}_4 + 8\text{H}_2 + \text{воздух}$ ($g_\delta = 2725 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 1.02$, $n = 2$, $f = 1.63 \text{ кГц}$, $D = 1.28 \text{ км}/\text{с}$, $p_{c1} = 6.2 \cdot 10^5 \text{ Па}$)

рис. 1, *в*, что прохождение ПДВ согласовано по времени и пространству (ПДВ и развертка находятся друг против друга).

В данных опытах через 10 мс после инициирования развивалась НСД. Фронты ПДВ (*BC*) и присоединенные к ним шлейфы *CD* (косые ударные волны в продуктах реакции) движутся слева направо, сжигая поступающую из системы подачу смесь, подсвеченную продуктами сгорания ацетиленокислородной струйки. Поскольку невидимая часть камеры от торца до первого окна составляет 29 мм, высота каждого окна 93 мм, а расстояние между окнами 24 мм, то размер ПДВ, исходя из масштабов окон, оценивается значением $h \approx 15 \text{ см}$, а отношение $h/l \approx 1/5$, где $l = 79 \text{ см}$ — расстояние между волнами. Отметим, что ПДВ в данной смеси достаточно стабильны по скорости и структуре.

Заметим, что в наших экспериментах частота вращения ПДВ f по данным рис. 1, *a* или рис. 1, *б* определяется однозначно с точностью $\pm 0.4 \%$ (250 ± 1 пиксель). Тогда из формулы [2]

$$Dn = \pi d_c f \quad (1)$$

следует, что произведение скорости ПДВ на их число (Dn) также определяется однозначно с указанной точностью. Но число ПДВ, размещающихся по периметру камеры, особенно при большом их количестве, по данным рис. 1, *a* можно только оценивать, а по данным рис. 1, *б* — определить с погрешностью $\approx 0.4 \%$ [2].

Действительно, $x-t$ -диаграмма (рис. 1, *в*) позволяет найти ориентировочную скорость ПДВ D'_t по наклону развертки:

$$D'_t = \Delta l / (N \Delta \tau), \quad (2)$$

где $\Delta l = 20 \text{ мм}$ — ширина окна, N — число пикселей по ширине окна, $\Delta \tau = 2.38 \text{ мкс}$ — цена пикселя. При $D = 1.2 \pm 0.2 \text{ км}/\text{с}$ развертка занимает 7 ± 1 пикселей (меньшее число для большей скорости). Этот разброс по числу пикселей позволяет по формуле (2) с точностью $\pm 15 \%$ рассчитать ориентировочную скорость волны D'_t , затем из (1) надежно сделать выбор между одной или двумя волнами, после чего с погрешностью $\approx 0.4 \%$ определить среднюю скорость ПДВ за время обращения по окружности камеры ДК-500. Значения параметров НСД в ТВС с горючим $\text{CH}_4 + 8\text{H}_2$ представлены в первой строке табл. 1. Осциллограммы давления в системе подачи компонентов данной смеси и в камере сгорания (КС) близки к приведенным ниже для смеси $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2 + \text{воздух}$.

Горючее $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2$ ($m_{\text{H}} = 1/3$). На рис. 2 приведены характерные фрагменты фоторегистрограммы НСД в смеси $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2 + \text{воздух}$ при $n = 2$. В данном опыте НСД развивалась через 5 мс после инициирования. В диапазоне удельных расходов воздуха через кольцевую щель $g_\delta = 4050 \rightarrow 3100 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при $\phi = 0.94 \rightarrow 0.95$ реализованы две ПДВ с монотонно уменьшающейся (со временем) частотой вращения $f = 1.36 \rightarrow 1.33 \text{ кГц}$ и скоростью $D = 1.1 \rightarrow 1.04 \text{ км}/\text{с}$. Размер ПДВ оценивается значением $h \approx 25 \text{ см}$, а отношение $h/l \approx 1/6$. При $g_\delta \approx 3100 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ($g_\Sigma = 645 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$) наблюдали переход к одноволновому режиму НСД. Одна ПДВ существовала до конца эксперимента в диапазоне $g_\delta = 3100 \rightarrow 470 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при $\phi = 0.95 \rightarrow 0.97$ с частотой вращения $f = 0.83 \rightarrow 0.56 \text{ кГц}$ и скоростью $D = 1.26 \rightarrow 0.84 \text{ км}/\text{с}$. Размер фронта ПДВ составлял $h \approx 50 \text{ см}$, а отношение $h/l \approx 1/3$.

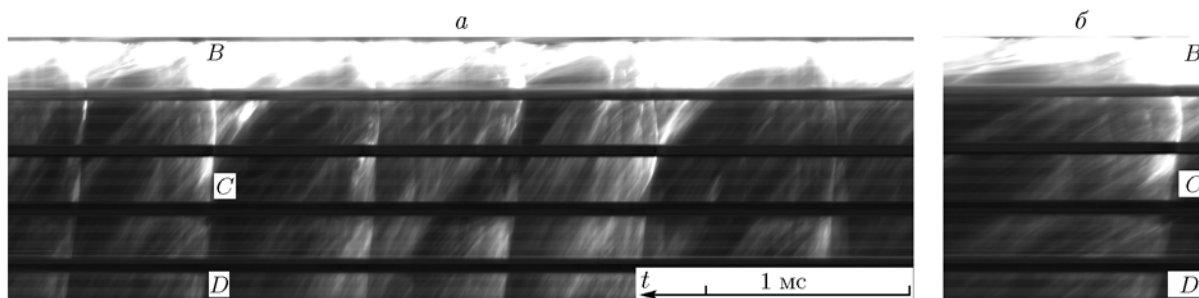


Рис. 2. Фрагменты фоторегистрограммы ПДВ в смеси $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2 + \text{воздух}$:
a — шесть ПДВ для двухволнового режима НСД, $g_\delta = 3327 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 0.95$, $f = 1.36 \text{ кГц}$, $n = 2$, $D = 1.07 \text{ км}/\text{с}$; *б* — пятая ПДВ и течение в ее окрестности, приведенные к реальному масштабу

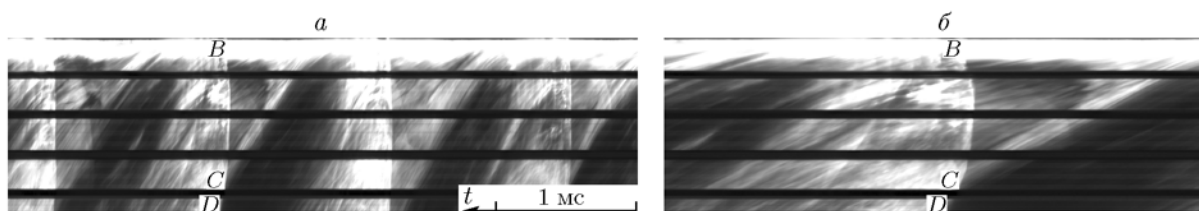


Рис. 3. Фрагмент фоторегистрограммы ПДВ в смеси $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2 + \text{воздух}$:
a — одноволновый режим НСД, $g_\delta = 1934 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 1.14$, $f = 0.826 \text{ кГц}$, $n = 1$, $D = 1.3 \text{ км}/\text{с}$; *б* — ПДВ и течение в ее окрестности, приведенные к реальному масштабу

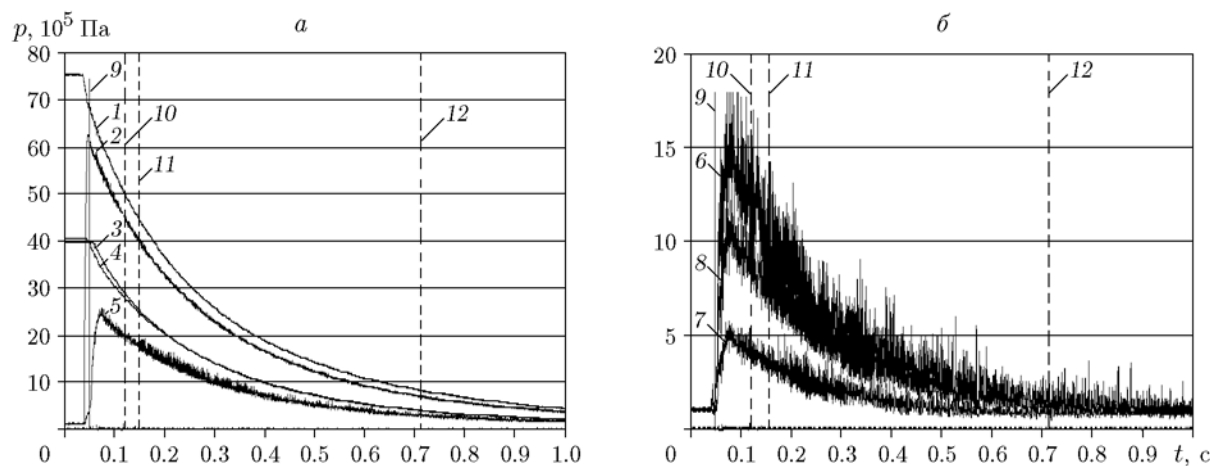


Рис. 4. Осциллограммы давления в системе подачи воздуха и горючего (*a*) и в детонационной камере ДК-500 (*б*):

1, 2 — соответственно в ресивере и коллекторе горючего, 3–5 — в ресиверах (3, 4) и коллекторе (5) воздуха, 6, 7 — статическое давление соответственно в начале и на выходе КС, 8 — полное давление на выходе КС, 9 — момент инициирования, 10 — давление, соответствующее НСД на рис. 2, 11 — граница между двухволновой и одноволновой НСД, 12 — граница существования НСД

В другом опыте в диапазоне $g_\delta = 2080 \rightarrow 470 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и при $\phi \approx 1.15$ реализована одна ПДВ с изменением частоты вращения $f = 0.85 \rightarrow 0.61 \text{ кГц}$ и скорости $D = 1.34 \rightarrow 0.96 \text{ км}/\text{с}$. Фрагмент фоторегистрограммы одноволновой НСД, полученный путем обработки

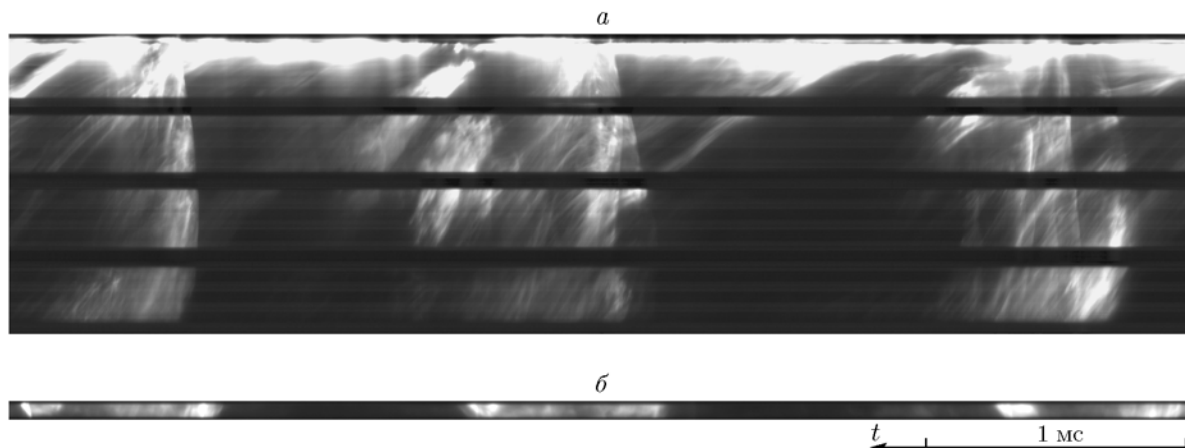
фотокадров, приведен на рис. 3, *a*, а фрагмент в реальном масштабе — на рис. 3, *б*.

На рис. 4 представлены осциллограммы давления в системе подачи (в ресивере (кривая 1) и коллекторе (2) горючего; в ресиверах (3, 4) и коллекторе (5) воздуха) и в КС (ста-

Таблица 1

Параметры НСД в смесях с горючим метан — водород двух составов

Горючее	$p_{m,a}/p_a$	g_δ , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	D , км/с	Режим
CH ₄ + 8H ₂ ($m_H = 1/2$)	24 → 4 4 → 2	3 450 → 760 760 → 310	1.02 → 0.96 0.96 → 0.78	1.66 → 1.32 1.4 → 0.65	2 2 ↔ 1	1.3 → 1.04 1.1 → 1.02	НСД
CH ₄ + 4H ₂ ($m_H = 1/3$)	25 → 18 18 → 2.5	4 050 → 3 100 3 100 → 470	0.94 → 0.95 0.95 → 0.97	1.36 → 1.33 0.83 → 0.56	2 1	1.1 → 1.04 1.26 → 0.84	НСД

Рис. 5. Фоторегистрограмма НМД (а) и развертка движения ПДВ (б) в смеси CH₄ + 2H₂ + воздух ($g_\delta = 3\,406$ кг/(с·м²), $\phi = 1$, $n = 2$, $f = 1.16$ кГц, $\langle D \rangle = 0.9$ км/с)

тическое в начале камеры (6) и на выходе (7), полное на выходе (8)). Резкий подъем давления в камере соответствует моменту поступления газов в КС, а после инициирующего импульса через 5 мс наблюдается возбуждение ПДВ. В течение всего эксперимента истечение газов из коллекторов воздуха и горючего в КС, а также продуктов из нее наружу было критическим.

Как видно из рис. 4,а, после смены двухволнового режима НСД на одноволновый (граница 11) заметно повышается амплитуда пульсаций давления в КС и коллекторе воздуха. При детальном рассмотрении этих колебаний (растяжение во времени сигналов) обнаружено, что их частота соответствует частоте вращения одной ПДВ. Очевидно, что при частоте собственных колебаний датчика около 10 кГц не фиксируются крутые фронты ПДВ, однако регистрируется факт их существования. При двухволновом режиме НСД регистрируемые колебания давления менее регулярны. Значения параметров НСД в ТВС с горючим CH₄ + 4H₂ представлены в табл. 1.

2.2. Непрерывная многофронтная детонация со встречными ПДВ

Горючее CH₄ + 2H₂ ($m_H = 1/5$). На рис. 5,а приведен характерный фрагмент фоторегистрограммы детонационного процесса в смеси CH₄ + 2H₂ + воздух, а в табл. 2 (строка 1) — параметры процесса в исследованном диапазоне расходов смеси.

В данном опыте после инициирования развивался детонационный режим в диапазоне удельных расходов $g_\delta = 3\,916 \rightarrow 574$ кг/(с·м²) при $\phi = 1.0 \rightarrow 1.23$ с частотой вращения волн $f = 1.34 \rightarrow 0.86$ кГц и средней скоростью $\langle D \rangle = 1.06 \rightarrow 0.68$ км/с. Отметим, что при $g_\delta < 574$ кг/(с·м²) ($g_\Sigma < 122$ кг/(с·м²)) горение протекало в обычном режиме.

Предварительный анализ фрагмента фоторегистрограммы на рис. 5,а показал, что размер фронта ПДВ составляет $h = 25 \div 50$ см. Наблюдаются очень нерегулярная структура и отдельные более слабые волны, направление которых фоторегистрограмма не позволяет определить. Периодичность появления светящейся области в продольных окнах равна $\Delta t \approx$

Таблица 2

Параметры непрерывной многофронтной и спиновой детонации
в смесях с горючим метан — водород трех составов

Горючее	$p_{m,a}/p_a$	g_δ , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	D , км/с	Режим
CH ₄ + 2H ₂ ($m_H = 1/5$)	22 → 3 <3	3916 → 574 <574	1.0 → 1.23 >1.23	1.34 → 0.86 —	2 —	1.06 → 0.68 —	НМД Горение
CH ₄ + 1.5H ₂ ($m_H = 3/19$)	19 → 13.5 <13.5	3405 → 2570 <2570	1.0 → 1.08 >1.08	1.34 → 1.02 —	2 —	1.05 → 0.8 —	НМД Горение ↔ НМД
CH ₄ + H ₂ ($m_H = 1/9$)	32.5 → 13.4 13.4 → 3.6 <3.6	6280 → 2850 2850 → 725 <725	0.8 → 1.02 1.02 → 1.56 >1.56	— 1.1 → 1.01 —	— 1 —	— 1.73 → 1.6 —	Горение НСД вне КС Горение

1.72 мс, т. е. средняя частота ее появления напротив окна $f \approx 0.58$ кГц. Если принять, что вращается одна ПДВ, то скорость ее вращения, согласно (1), составит $D \approx 0.9$ км/с относительно наружного диаметра КС.

В контрольном опыте с идентичными исходными параметрами проведена съемка процесса на развертку движения волн через поперечную щель (рис. 5,б). Видно, что в смеси CH₄ + 2H₂ + воздух существует встречное движение волн — ПДВ направлены в разные стороны и имеют различный наклон. Это значит, что наше предположение о НСД оказалось неверным, для данной смеси наблюдается движение двух периодически сталкивающихся встречных ПДВ (ср. с рис. 1,б), которые будем обозначать ВПДВ. Это принципиально важный вывод: впервые экспериментально установлено, что в камере ДК-500 для смеси метан/водород — воздух при определенных условиях непрерывная детонация может также распространяться в режиме со встречными ПДВ. По аналогии с классической многофронтной газовой детонацией [5], обнаруженные режимы непрерывной детонации с ВПДВ будем называть непрерывной многофронтной детонацией (НМД).

Заметим, что в промежутке между соударениями встречные ПДВ имеют переменную скорость, поэтому при фиксированной частоте их скорость можно характеризовать только как среднюю за период $\langle D \rangle$.

Горючее CH₄ + 1.5H₂ ($m_H = 3/19$). После инициирования развивался режим НМД в диапазоне удельных расходов $g_\delta = 3405 \rightarrow 2570$ кг/(с·м²) при $\phi = 1.0 \rightarrow 1.08$ с частотой $f = 1.34 \rightarrow 1.02$ кГц и средней скоростью $\langle D \rangle = 1.05 \rightarrow 0.8$ км/с. Структура волн была

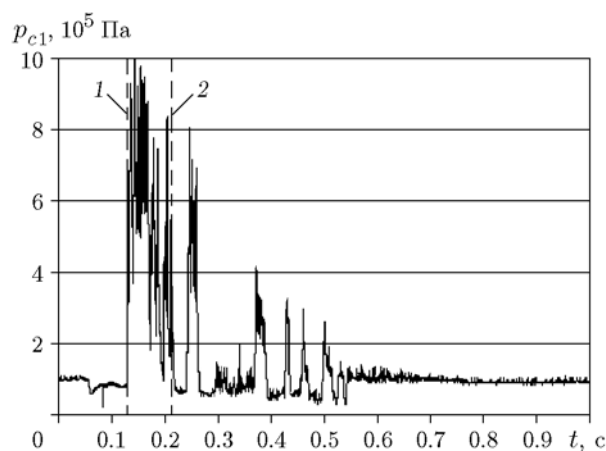


Рис. 6. Статическое давление в начале КС при НМД (промежуток времени 1–2) и при смене режимов НМД и горения (правее момента времени 2) для горючего CH₄ + 1.5H₂

более нерегулярной, чем для горючего CH₄ + 2H₂ (см. рис. 5,а). При $g_\delta < 2570$ кг/(с·м²) наблюдали горение с появляющимися иногда ВПДВ и косыми волнами. Смену режимов наглядно отображает статическое давление p_{c1} на входе в КС (рис. 6).

В начале эксперимента ($0.13 < t < 0.21$ с) в режиме НМД среднее давление в КС было на уровне $\langle p_{c1} \rangle \approx 7 \cdot 10^5$ Па. Резкое снижение давления $\langle p_{c1} \rangle \approx 0.7 \cdot 10^5$ Па при $t > 0.21$ с соответствует переходу режима НМД к горению. Такое низкое давление в камере ДК-500 указывает в лучшем случае на частичное выгорание ТВС (см. ниже). С уменьшением расхода смеси пики давлений в режиме с ВПДВ монотонно уменьшаются. Сравнение давлений на выходе из КС при горении показывает, что при НМД истечение продуктов из камеры остав-

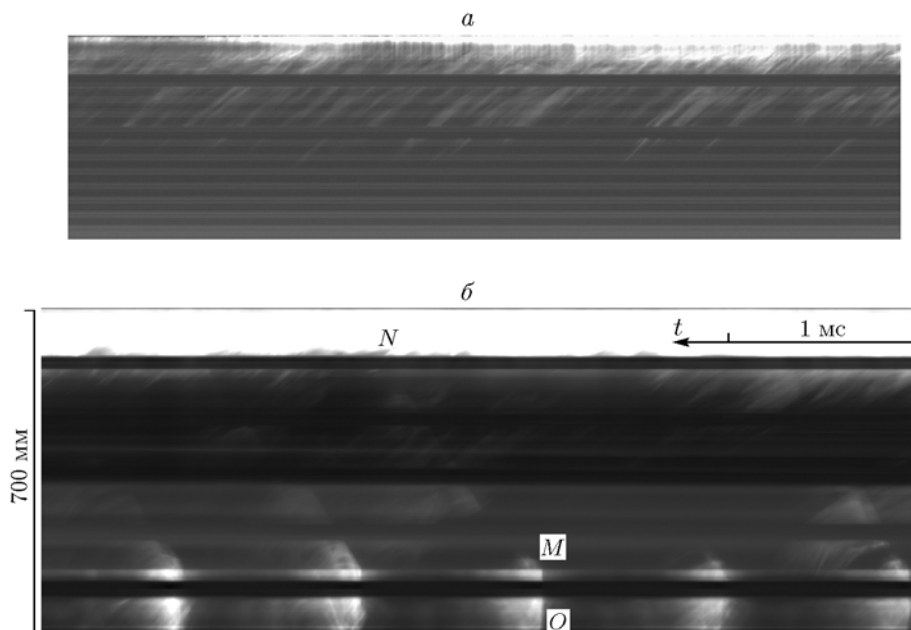


Рис. 7. Фрагменты фоторегистрограмм горения состава $\text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{воздух}$ (а) и ПДВ, вращающиеся за кольцевым зазором в камере ДК-500 (б):

а — $g_\delta = 4130 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 1$, $p_{c1} = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$; б — $g_\delta = 2520 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 1.32$, $n = 1$, $f = 1.09 \text{ кГц}$, $D = 1.73 \text{ км}/\text{с}$, $p_{c4} \approx 1.5 \cdot 10^5 \text{ Па}$

ся сверхкритическим, а при горении — докритическим. Осциллограммы давления в системе подачи практически идентичны приведенным на рис. 4,а.

Итак, в ДК-500 для смесей составов $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2 + \text{воздух}$ и $\text{CH}_4 + 1.5\text{H}_2 + \text{воздух}$ впервые реализован режим НМД с ВПДВ.

2.3. Горение в кольцевом канале и ПДВ вне камеры сгорания

Горючее $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ ($m_{\text{H}} = 1/9$). Дальнейшее уменьшение доли водорода в составе горючего до $m_{\text{H}} = 1/9$ приводило к принципиальному изменению режимов сжигания исследуемой ТВС. В диапазоне удельных расходов воздуха $g_\delta = 6280 \rightarrow 2850 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при $\phi = 0.8 \rightarrow 1.02$ в камере ДК-500 фиксировалось горение. Характерная фоторегистрограмма горения приведена на рис. 7,а.

В диапазоне $g_\delta = 2850 \rightarrow 725 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при $\phi = 1.02 \rightarrow 1.56$ наблюдали регулярные поперечные детонационные волны MO (см. рис. 7,б), вращающиеся за кольцевым зазором камеры ДК-500 с частотой $f = 1.1 \rightarrow 1.01 \text{ кГц}$ и скоростью $D = 1.73 \rightarrow 1.6 \text{ км}/\text{с}$. Причем от ПДВ отходят в область кольцевого зазора косые ударные волны MN , являющиеся их шлей-

фами. Низкая средняя массовая скорость продуктов в КС ($\approx 0.3 \text{ км}/\text{с}$) обусловлена их торможением косыми волнами. Это видно на фоторегистрограмме рис. 7,б по резкому изменению угла наклона траекторий частиц продуктов при прохождении через шлейф MN .

В области расходов $g_\delta < 725 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при $\phi > 1.56$ снова наблюдалось горение (как на рис. 7,а). Количественные данные по расходу и коэффициенту избытка горючего приведены в табл. 2. Осциллограммы давлений в системе подачи практически не отличались от изображенных на рис. 4,а, однако давления в КС, как следует из рис. 8, отличались существенно, в том числе и давление на входе p_{c1} . На рис. 8 для сравнения приведена также осциллограмма статического давления на расстоянии 60 мм от среза КС (p_{c4}). Видно, что до иницирования горения ($\approx 0.07 \text{ с}$) на выходе из КС $p_{c30}/p_{c3} > 1.8$, т. е. истечение холодной смеси сверхзвуковое. После иницирования в КС развивается частичное горение (ср. с уровнями давления на рис. 3,б). Затем ($\approx 0.2 \text{ с}$) за пределами КС формируется тангенциальная высокочастотная неустойчивость, переходящая в НСД с дожиганием ТВС в ПДВ. При этом давление в КС и за ее пределами резко повышается.

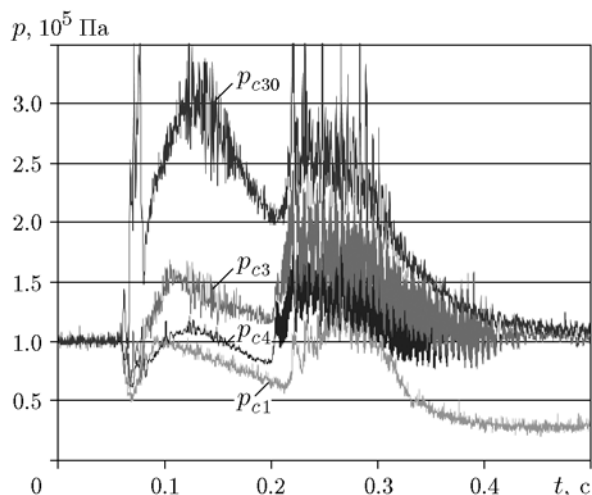


Рис. 8. Давление в КС на входе и выходе кольцевого канала (p_{c1} , p_{c3} и p_{c30}) и на расстоянии 60 мм от ее среза (p_{c4})

Частоты колебаний давления совпадают с частотами ПДВ, зафиксированными на фоторегистрограмме. Заметим, что режимы НСД вне КС уже зарождались в смеси $\text{CH}_4 + 1.5 \text{H}_2 + \text{воздух}$.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Направление вращения ПДВ относительно завихренного потока воздуха

Просмотр в режиме кино отдельных кадров, снятых высокоскоростной видеокамерой, показал, что ПДВ двигались как навстречу завихренному потоку воздуха, так и попутно с ним. При сжигании смесей $\text{CH}_4 + 8\text{H}_2 + \text{воздух}$ и $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2 + \text{воздух}$ две ПДВ, изображенные на рис. 1, 2, вращались навстречу потоку. В том же направлении вращалась ПДВ и при переходе в одноволновый режим. По следам на стенках КС, оставленных натекающей смесью и продуктами сгорания, а также по отдельным кадрам видеосъемки определяли угол их наклона к образующей поверхности стенки — $\theta \approx 60^\circ$. По фоторегистрограммам, которые являются $x-t$ -диаграммами движения светящихся частиц в осевом направлении, определяли скорость натекающей смеси: $v_x \approx 450$ м/с при $n = 2$ и $v_x = 380$ м/с при $n = 1$. Таким образом, в тангенциальном направлении поток у входа КС двигался со скоростью $v_y = v_x \tan \theta \approx 260 \div 220$ м/с. Поэтому скорости непрерывной

детонации относительно потока смеси превышали измеренные по фоторегистрограммам и разверткам — $D_v = D + v_y$.

В опытах со смесью $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2 + \text{воздух}$, но в другом эксперименте в диапазоне $g_\delta = 2080 \rightarrow 470$ кг/(с·м²) при $\phi \approx 1.15$ зафиксирована смена направления одноволновой ПДВ. В диапазоне $g_\delta = 2080 \rightarrow 1610$ кг/(с·м²) наблюдали попутное с потоком вращение волны, а при $g_\delta < 1610$ кг/(с·м²) — встречное вращение. При этом скорость волн в попутном направлении составляла $D_v = D - v_y \approx 1.34 - 0.22 = 1.12$ км/с, а во встречном — $D_v = D + v_y \approx 1.1 + 0.22 = 1.32$ км/с. Вопрос о направлении движения ПДВ относительно завихренного потока остается открытым.

3.2. Нерегулярность структуры ПДВ

Следует отметить нерегулярность структуры и скорости ПДВ в смеси $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2 + \text{воздух}$ (см. рис. 2). Впереди и позади детонационного фронта ВС появляются ударные скачки произвольной формы, которые нестабильны, поэтому постоянно меняются начальные условия перед ПДВ, влияющие на их регулярность. Это понятно, так как даже классическая детонация метанокислородных смесей в стандартных условиях достаточно нерегулярна, что проявляется в структуре «ячеек» — конфигураций, прочерчиваемых на стенках трубы неоднородностями поля давлений, и островков недогоревшего газа за детонационными участками фронтов [6]. Для всех исследованных горючих смесей истечение на выходе из КС сверхкритическое, поэтому НСД определяется внутренними условиями в КС. Отношение полного давления на выходе КС к давлению в коллекторе воздуха при $K_S = 5$ составляло $p_{c30}/p_{m,a} = 0.45 \pm 0.04$, т. е. немного меньше, чем наблюдали ранее для смесей синтез-газа с воздухом [3].

3.3. Влияние химического состава ТВС на детонационный режим

Зависимости частоты вращения ПДВ f от удельного расхода воздуха через кольцевую щель g_δ для смесей $\text{CH}_4 + 8\text{H}_2 + \text{воздух}$ и $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2 + \text{воздух}$ представлены на рис. 9 (точки 1, 2). Там же для сравнения нанесены данные для смесей H_2 — воздух (точки 3) и синтез-газ — воздух [7] (точки 4).

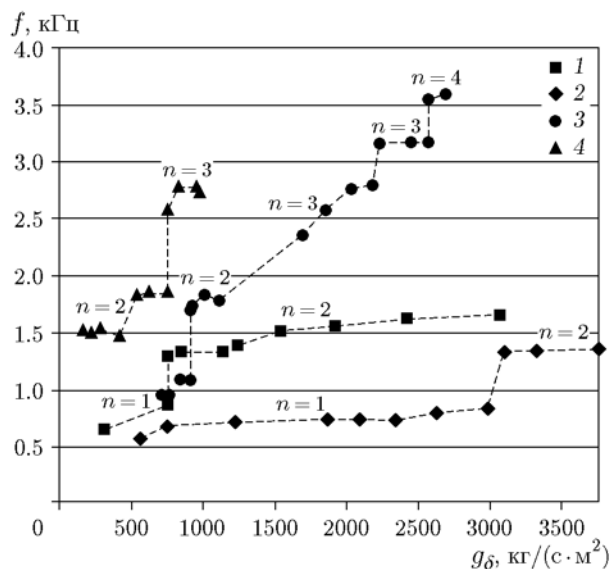


Рис. 9. Частота вращения ПДВ в зависимости от удельного расхода воздуха через кольцевую щель в камере ДК-500:

1 — $\text{CH}_4 + 8\text{H}_2$, 2 — $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2$, 3 — H_2 , 4 — $\text{CO} + 2\text{H}_2$ [7]

Хорошо видно, что в ДК-500 максимальную частоту вращения $f \approx 3.6$ кГц (четырёхволновый режим НСД) имеют ПДВ в смеси $\text{H}_2 + \text{воздух}$ (точки 3), а с увеличением доли метана в двухкомпонентном горючем CH_4/H_2 частота вращения ПДВ при фиксированных значениях g_δ уменьшается. Так, для горючего $\text{CH}_4 + 8\text{H}_2$ (точки 1) в широком диапазоне удельных расходов воздуха частота остается практически постоянной в двухволновом режиме НСД и его устойчивое состояние заканчивается при $g_\delta = 760$ кг/(с·м²), когда появляется конкуренция двух волн с одной ($n = 2 \leftrightarrow 1$). И уже на границе существования НСД по удельному расходу воздуха $g_{\delta, \text{min}} \approx 310$ кг/(с·м²) превалирует одна волна. Для горючего $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2$ (точки 2) двухволновый режим существует только при высоких удельных расходах воздуха и уже при $g_\delta = 3100$ кг/(с·м²) наблюдается переход от двухволнового режима НСД к одноволновому со скачком частоты $f = 1.33 \rightarrow 0.83$ кГц. По приведенным на рис. 9 значениям частоты ПДВ легко пересчитать скорости НСД относительно наружного диаметра кольцевого канала камеры d_c по формуле $D = \pi d_c f / n$. Обращают на себя внимание низкие скорости волн — $D \approx 1.0$ км/с.

Если предварительно проводится неполное термическое окисление метана до синтез-

газа ($\text{CH}_4 + (1/2)\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$), то НСД в смеси синтез-газ — воздух реализуется в камерах ДК-500 [7] при удельных расходах воздуха (точки 4) на порядок меньше, чем для смеси $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2$ (ср. крайние левые точки 2 и 4 на рис. 8). Более того, уже при $g_\delta \approx 750$ кг/(с·м²) в синтез-газе реализуется регулярный трехволновый режим НСД (т. е. $d_{cr} < 168$ мм). Последнее означает, что предварительная конверсия трудно детонирующего горючего CH_4 — более эффективный способ, чем добавка в него водорода для существенного (в несколько раз) уменьшения критического диаметра НСД и расширения области ее реализации с высокими детонационными скоростями.

3.4. Режимы НМД

При сжигании смесей $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2 + \text{воздух}$ и $\text{CH}_4 + 1.5\text{H}_2 + \text{воздух}$ с $\phi = 1.0$ зафиксировано встречное вращение двух сталкивающихся поперечных волн (режим НМД). Отметим, что в работе [8] они были идентифицированы как волны, вращающиеся в одном направлении. В режиме НМД текущие скорости поперечных волн переменны, до столкновения волны стремятся по скорости и по структуре к детонационным, а после столкновения распространяются в виде ударных. Поэтому вполне объяснимы и их низкие средние скорости. В плоскорадиальной КС внешнего диаметра $d_{c1} = 130$ мм с прозрачными боковыми стенками режимы НМД со встречными ПДВ наблюдали также в работе [9], причем средняя скорость НМД этиленокислородной смеси составила $\langle D \rangle = 0.51 \div 0.67 D_{\text{СЖ}}$, где $D_{\text{СЖ}}$ — скорость детонации Чепмена — Жуге.

При сжигании смеси $\text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{воздух}$ с $\phi = 1.1 \pm 0.2$ при удельных расходах воздуха $g_\delta > 3000$ кг/(с·м²) в КС наблюдали только горение, поддерживаемое струей горячих продуктов системы иницирования. По видимому, необходимая высота фронта BC (h) была настолько большой, что структура ПДВ не вписывалась в размеры КС. Однако при $g_\delta < 3000$ кг/(с·м²) за пределами КС начала развиваться высокочастотная тангенциальная неустойчивость. Появившиеся акустические волны усиливались за счет интенсификации химической реакции за ними. Через 10 ÷ 12 оборотов волны принимали детонационные очертания и двигались навстречу закрутке потока смеси. Интересно, что акустические

волны имели примерно ту же частоту, что и ПДВ. Это значит, что ПДВ за пределами камеры тесно связаны с акустикой продуктов сгорания, что имеет место при спине в трубах [5]. Следует отметить, что для водородокислородной смеси ПДВ за пределами камеры существовали и в ее плоскорadiaльном исполнении с истечением к периферии [10]. Для однозначного объяснения выхода ПДВ за пределы кольцевых каналов необходимы дальнейшие исследования.

Поскольку в смеси воздуха с горючим $\text{CH}_4 + 1.5 \text{H}_2$ наблюдали как НМД, так и горение, а в смеси с горючим $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ — только горение в исследованном диапазоне удельных расходов воздуха в КС, то можно утверждать, что в данных экспериментах в камере ДК-500 нижний предел реализации НСД по добавке водорода в метан составил $m_{\text{H}} \approx 1/3$, а предел реализации НМД — $m_{\text{H}} \approx 3/19 = 0.16$.

3.5. Анализ давлений в КС

Сравнение осциллограмм всех проведенных экспериментов показал, что при одинаковых удельных расходах воздуха g_{δ} статическое давление в камере (p_{c1}) при обычном горении вдвое больше, чем при истечении холодной смеси компонентов, втрое — при НСД вне КС и вчетверо — при НСД в детонационной камере. Эта последовательность соотношений характеризует полноту сгорания смеси в различных режимах. Следует отметить, что полноту сгорания смеси при НСД можно оценить, используя формулу $p_{c30} \approx (D_{\text{СД}}/\gamma)g_{\Sigma}$ [2], где $D_{\text{СД}} \approx 1800$ м/с при стандартных условиях ($T_0 = 293$ К, $p_0 = 1.013 \cdot 10^5$ Па), $\gamma \approx 1.3$ — показатель изоэнтропы продуктов. Оценка полного давления по этой формуле для смеси $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2 + \text{воздух}$ при $g_{\Sigma} = 784$ кг/(с·м²) дает значение $p_{c30} = 10.85 \cdot 10^5$ Па, что вполне соответствует результатам измерений в начале процесса (осциллограмма 8 на рис. 4, б). Датчик статического давления зафиксировал в начале КС давление $p_{c1} = 11.9 \cdot 10^5$ Па $\approx p_{c30}$. Таким образом, потери полного давления потока по длине камеры примерно равны его динамической составляющей.

ВЫВОДЫ

В проточной цилиндрической камере ДК-500 ($K_S = 5.0$) с завихренной подачей воздуха для двух составов горючего $\text{CH}_4 + 8\text{H}_2$

и $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2$ впервые реализованы режимы непрерывной спиновой детонации с поперечными детонационными волнами. Также впервые получены режимы непрерывной многофронтной детонации со сталкивающимися поперечными детонационными волнами для горючих $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2$ и $\text{CH}_4 + 1.5\text{H}_2$, отличающиеся сильной нерегулярностью структуры поперечных волн, а также их низкой средней скоростью. В смеси состава $\text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{воздух}$ получены режимы непрерывной спиновой детонации за кольцевым зазором камеры ДК-500. Для всех детонирующих составов горючего CH_4/H_2 определены нижние пределы существования детонации по удельному расходу смеси, а также по содержанию водорода в двухкомпонентном горючем.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Войцеховский Б. В.** Стационарная детонация // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 129, № 6. — С. 1254–1256.
2. **Быковский Ф. А., Ждан С. А.** Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
3. **Быковский Ф. А., Ждан С. А.** Современное состояние исследований непрерывной детонации топливовоздушных смесей (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 31–46.
4. **Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф.** Непрерывное детонационное сжигание топливовоздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 3. — С. 120–131.
5. **Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е.** Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
6. **Субботин В. А.** Два типа структуры поперечных волн в многофронтной детонации // Физика горения и взрыва. — 1975. — Т. 11, № 1. — С. 96–102.
7. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Самсонов А. Н.** Масштабный фактор при непрерывной спиновой детонации смесей синтез-газ — воздух // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 2. — С. 71–83.
8. **Vykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F.** Combustion of methane/hydrogen — air mixtures in the continuous detonation regime // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. V. 2: Combustion and Detonation. — Moscow: Torus press, 2016. — P. 261–267.

9. Nakagami S., Matsuoka K., Kasahara J., et al. Experimental study of the structure of forward-tilting rotating detonation waves and highly maintained combustion chamber pressure in disk-shaped combustion // Proc. Combust. Inst. — 2017. — V. 36, iss. 2. — P. 2673–2680.
10. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Самсонов А. Н., Мисовец О. В. Непрерывная детонация водородокислородной смеси в плоскорadiaльной камере с истечением к периферии // Всерос. конф. «XXXI Сибирский теплофизический семинар», 17–19 ноября 2014, Новосибирск, Россия: сб. докл. — С. 173–178.

Поступила в редакцию 19/V 2017 г.
