

УДК 534.222.2, 544.454.3

# НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ СМЕСЕЙ $\text{CH}_4/\text{H}_2$ — ВОЗДУХ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ГЕОМЕТРИИ КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЫ 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 смесей  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  — воздух с массовыми долями  $\text{H}_2$  в горючем  $0 \div 1/5$  реализованы в проточной кольцевой камере сгорания диаметром 503 мм при варьировании ее геометрии. Исследовано влияние геометрии камеры на скорость и число поперечных детонационных волн, давление в камере и удельный импульс. Установлено, что заужение площади выходного сечения камеры сгорания в три раза позволяет реализовать двухволновые режимы непрерывной спиновой детонации смеси чистый метан — воздух. По измеренным на выходе из камеры сгорания давлениям торможения определены удельные импульсы при непрерывной детонации в зависимости от состава горючего.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, метан, водород, воздух, поперечные детонационные волны, геометрия кольцевой камеры сгорания, система подачи топлива, фоторегистрация, структура течения, тяговые характеристики.

DOI 10.15372/FGV20200505

## ВВЕДЕНИЕ

Результаты изучения в кольцевых камерах сгорания (КС) непрерывной спиновой детонации (НСД) по схеме Б. В. Войцеховского [1] обобщены в книге [2]. Обзор современного состояния экспериментальных исследований НСД в проточных кольцевых КС ряда топливоздушных смесей с горючими ацетилен, водород и синтез-газ представлен в [3]. Первые экспериментальные данные по реализации одноволновых и двухволновых режимов НСД трудно детонирующих смесей метан/водород — воздух при массовой доле водорода в бинарном горючем  $m_{\text{H}} = 1/2$  и  $1/3$  удалось получить в проточной кольцевой цилиндрической КС диаметром  $d_c = 503$  мм (ДК-500) [4]. Там же было установлено, что с уменьшением доли водорода в бинарном горючем до  $m_{\text{H}} = 1/5$  и  $3/19$  формировались режимы непрерывной многофронтной детонации (НМД) со сталкивающимися поперечными детонационными волнами (ПДВ), отличающимися сильной нерегулярностью структуры, а также низкой средней скоростью. При дальнейшем уменьшении параметра  $m_{\text{H}}$  в КС ДК-500 осуществлялись только

режимы обычного горения. Анализ экспериментов [4] поставил вопрос об исследовании возможных способов воздействия на детонационный процесс, приводящих к уменьшению параметра  $m_{\text{H}}$ . Так, в [5] при исследовании в камере ДК-500 влияния добавочной подачи воздуха в продукты сгорания смесей метан/водород — воздух на параметры НСД удалось снизить долю водорода в бинарном горючем до  $m_{\text{H}} = 1/9$ .

Цель настоящей работы — для смесей  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  с воздухом при доле водорода  $m_{\text{H}} = 0 \div 1/5$  исследовать в камере ДК-500 влияние геометрии КС на область реализации НСД, давление в КС и тяговые характеристики при уменьшении доли водорода в смеси.

## 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментальной КС представлена на рис. 1. Размеры КС: диаметр наружной стенки 1 —  $d_{c1} = 503$  мм, внутренний

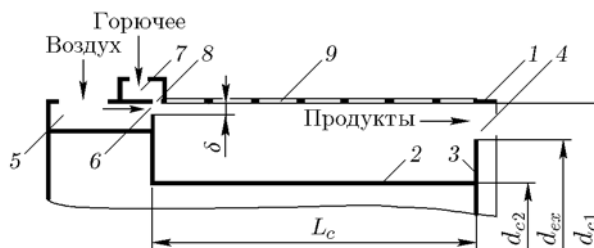


Рис. 1. Схема кольцевой камеры сгорания

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-01-00270а).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., 2020.

2 —  $d_{c2} = 387$  мм (расстояние между стенками  $\Delta = 58$  мм, площадь поперечного сечения  $S_{\Delta} = \pi(d_{c1} - \Delta)\Delta = 811$  см<sup>2</sup>), длина камеры  $L_c = 780$  мм. Опыты проводились как в канале с постоянной площадью сечения ( $S_{\Delta} = 811$  см<sup>2</sup>), так и с заужением кольцевого канала на выходе КС с помощью дисковых перегородок 3 диаметром  $d_{ex} = 440$  или 467 мм, создающих кольцевые зазоры 4 с внешней стенкой  $\Delta_{ex} = (d_{c1} - d_{ex})/2 = 31.5$  и 18 мм с площадью сечения  $S_{ex} = \pi(d_{c1} - \Delta_{ex})\Delta_{ex} = 466.3$  и 274 см<sup>2</sup> соответственно.

Воздух в КС поступал из двух ресиверов объемом  $V_{r,a} = 87.7$  л (на рисунке не показаны) с закруткой через коллектор 5 и далее кольцевую щель 6 шириной  $\delta = 10$  мм (площадь проходного сечения  $S_{\delta} = \pi(d_{c1} - \delta)\delta = 155$  см<sup>2</sup>). Отношение площадей сечения КС и кольцевой щели подачи воздуха на входе составляло  $K_S = S_{\Delta}/S_{\delta} = 5.23$ , а отношение площадей каналов на выходе КС и подачи воздуха —  $K_{ex} = S_{ex}/S_{\delta} = 5.23, 3.0$  или 1.77.

Бинарное горючее  $\text{CH}_4 + m\text{H}_2$  подавали в КС из ресиверов-смесителей объемом  $V_{r,f} = 24$  или 14.75 л (на рисунке не показаны) через кольцевой коллектор 7 и форсунку 8, имеющую 600 отверстий шириной 0.35 мм и глубиной 1.45 мм, ориентированных попарно навстречу друг другу под углом 90° и под углом к оси КС 45°.

Расход воздуха изменялся в диапазоне  $G_a = 1.88 \div 23.5$  кг/с (удельные расходы через кольцевую щель  $g_{\delta} = G_a/S_{\delta} = 121 \div 1518$  кг/(с·м<sup>2</sup>)), а горючего —  $G_f = 0.08 \div 1.25$  кг/с. Коэффициент избытка горючего варьировался в пределах  $\phi = 0.78 \div 1.78$ . Процесс инициировался в начале КС струей продуктов горения ацетилена и кислорода, которая также подсвечивала детонационные волны и течение в их окрестности. Истечение продуктов происходило в окружающую среду с давлением  $p_a = 10^5$  Па.

Процесс фотографировался высокоскоростной камерой Photron Fastcam SA5 в режиме съемки 420 000 кадр/с через продольные окна из оргстекла 9, расположенные друг за другом вдоль стенки камеры (см. рис. 1). Размеры каждого окна: ширина 20 мм, длина 93 мм; расстояние между окнами 24 мм. Размеры окон служили масштабом элементов структуры течения в КС. Метод определения частоты  $f$ , числа ПДВ  $n$  и скорости НСД  $D$

аналогичен [2, 3]. Датчиками давления фирмы «Trafag» (Швейцария) класса точности 0.5 % измерялось давление: в ресивере и коллекторе горючего ( $p_{r,f}, p_{m,f}$ ), ресиверах и коллекторе воздуха ( $p_{r,a1}, p_{r,a2}, p_{m,a}$ ), а также статическое ( $p_{c1}, p_{c3}$ ) и полное ( $p_{c30}$ ) давление в КС. Статическое давление  $p_{c1}$  регистрировалось на расстоянии 15 мм от входа в КС, а статическое  $p_{c3}$  и полное давление  $p_{c30}$  — вблизи выхода из КС.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В камере ДК-500 при  $K_S = 5.23$  и варьировании геометрического параметра  $K_{ex} = 1.77 \div 5.23$  на выходе из КС в области указанных выше параметров подачи компонентов смеси  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  — воздух ( $G_a, G_f$ ) с горючим составов  $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2, \text{CH}_4 + \text{H}_2, \text{CH}_4 + 0.5\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$  были исследованы возможности реализации НСД.

### 2.1. Режимы детонации в смеси $\text{CH}_4/2\text{H}_2$ — воздух при заужении выходного сечения КС

Первая серия опытов проведена в КС без заужения выходного сечения  $K_s = K_{ex} = 5.23$ . В диапазоне расходов воздуха  $G_a = 2.46 \div 14$  кг/с при  $\phi = 0.93 \div 1.57$  получен режим пульсирующей детонации с частотой пульсаций волн  $f \approx 0.13 \div 0.2$  кГц. Фрагмент типичной фоторегистрограммы пульсирующей детонации приведен на рис. 2, а, а осциллограмма изменения во времени статического давления  $p_{c1}$  в КС — на рис. 2, б.

Процесс инициировался струей продуктов горения ацетилена и кислорода, факел которой поджигал топливовоздушную смесь после подачи горючего в КС. На рис. 2, б в момент воспламенения горючего ( $t \approx 0.1$  с) виден скачок давления от  $p_{c1} \approx 0.75 \cdot 10^5$  Па до  $p_{c1} \approx 2.4 \cdot 10^5$  Па и через 50 мс ( $t \approx 0.15$  с) давление начало пульсировать с частотой  $f \approx 0.13 \div 0.2$  кГц, поскольку в КС реализовывалась пульсирующая детонация (рис. 2, а). Формирование продольной волны происходило вне КС и не попадало в поле зрения видеокamеры. При входе в КС она имеет слабое свечение и становится видимой лишь в ее середине (развертка  $MN$ ). Скорость волны относительно стенок КС около 0.6 км/с, а относительно натекающей смеси — 1 км/с. В верхней

Таблица 1

Параметры пульсирующей (ПД) и непрерывной спиновой детонации (НСД) в ДК-500 с горючим  $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2$

$K_{ex}$	$p_{m,a}/p_a$	$g\delta, \text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$\phi$	$f, \text{кГц}$	$n$	$D, \text{км}/\text{с}$	$p_{c3}/p_a$	$p_{c30}/p_a$	Режим
5.23	5.93 → 1.12	1 343 → 175	0.94 → 0.96	0.13 → 0.2	1	~ 1.0	2.0 → 0.94	2.5 → 1.04	ПД
3	10.3 → 1.95	1 518 → 328	0.91 → 1.36	1.3 → 1.44	2	1.03 → 1.13	4.2 → 1.17	6.94 → 1.48	НСД
	1.95 → 1.16	328 → 212	1.36 → 1.5	0.72 → 0.7	1	1.14 → 1.11	1.17 → 1.01	1.48 → 1.15	НСД
1.77	10.8 → 1.16	1 343 → 130	1.01 → 1.78	1.34 → 1.21	2	1.06 → 1.0	6.0 → 0.99	9.43 → 1.16	НСД

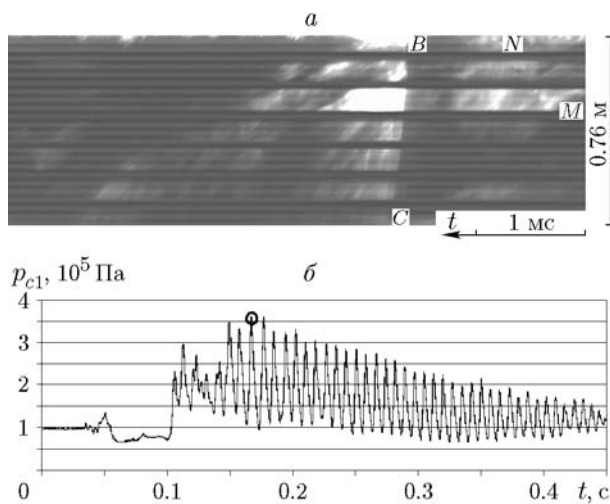


Рис. 2. Пульсирующая детонация в КС при  $K_S = K_{ex} = 5.23$ :

*a* — фоторазвертка пульсирующей детонации ( $G_a = 20.8 \text{ кг}/\text{с}$ ,  $\phi = 0.94$ ,  $f = 0.13 \text{ кГц}$ ); *б* — осциллограмма статического давления  $p_{c1}$  в КС (кружок соответствует системе волн рис. 2, *a*)

половине КС за продольной волной наблюдается усиление свечения, по-видимому, за счет частичного сгорания поступающей смеси. После отражения продольной волны от переднего торца КС формируется поперечная (тангенциальная) детонационная волна *BC*, движущаяся слева направо, которая после сжигания сжатой смеси продольной волной *MN* трансформируется в ударную, а затем совсем исчезает. Частота появления продольной волны в КС возрастает от начала к концу эксперимента —  $f = 0.13 \rightarrow 0.2 \text{ кГц}$ . По-видимому, увеличение частоты пульсирующей детонации связано с возрастанием влияния противодавления окружающей среды на истечение из КС, что наблюдали ранее при автоколебательном режиме пульсирующей детонации в плоскорадиальных камерах при истечении к периферии [2, 6]. Изменение основных параметров процесса с пульсиру-

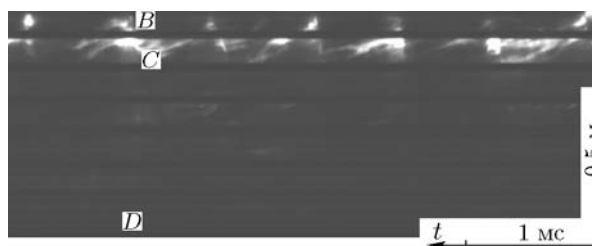


Рис. 3. НСД смеси  $\text{CH}_4/2\text{H}_2$  — воздух в КС при  $K_{ex} = 3.0$  ( $G_a = 20.4 \text{ кг}/\text{с}$ ,  $\phi = 0.95$ ,  $n = 2$ ,  $f = 1.41 \text{ кГц}$ ,  $D = 1.11 \text{ км}/\text{с}$ )

ющей детонацией представлено в первой строке табл. 1.

При уменьшении площади выходного сечения КС до  $K_{ex} = 3$  (установка дисковой перегородки диаметром  $d_{ex} = 440 \text{ мм}$  на выходе из КС) процесс качественно изменился. В смеси  $\text{CH}_4/2\text{H}_2$  — воздух были осуществлены режимы НСД: при  $G_a = 5.1 \div 23.5 \text{ кг}/\text{с}$  и  $\phi = 0.91 \div 1.36$  — двухволновый ( $n = 2$ ) с частотой вращения ПДВ  $f = 1.3 \div 1.44 \text{ кГц}$ ; при  $G_a = 3.3 \div 5.1 \text{ кг}/\text{с}$  и  $\phi = 1.36 \div 1.5$  — одноволновый ( $n = 1$ ) с  $f = 0.7 \div 0.72 \text{ кГц}$ . Фрагмент типичной фоторегистрограммы НСД ( $n = 2$ ) приведен на рис. 3. Две ПДВ движутся слева направо. Высота фронта *BC* составляет  $h \approx 20 \text{ см}$  (его нижнее окончание в точке *C* характеризуется повышением яркости продуктов детонации, проходящих через шлейф *CD* — ударную волну в продуктах). Структура волн достаточно нерегулярна, а их скорость относительно наружного диаметра КС составляет  $D = 1.08 \pm 0.05 \text{ км}/\text{с}$  как для двух ПДВ, так и для одной. Однако частота, являясь стабильной при двухволновом режиме ( $f = 1.37 \pm 0.07 \text{ кГц}$ ), с переходом на одноволновый режим НСД уменьшается вдвое.

Осциллограммы давления в системе подачи и в КС, относящиеся к режиму НСД (см. рис. 3), приведены на рис. 4, а изменение ос-

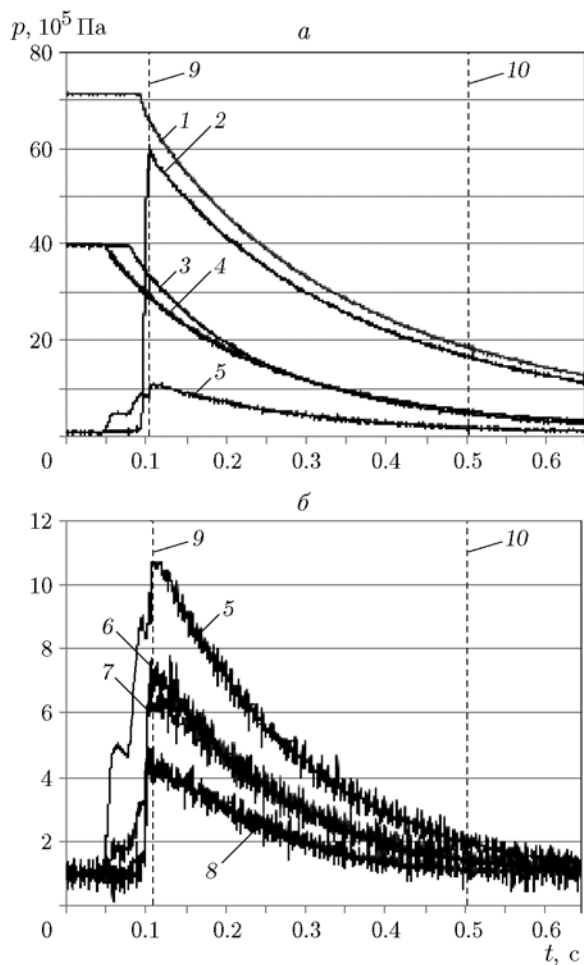


Рис. 4. Осциллограммы давления в системе подачи (а) и в КС (б) при  $K_{ex} = 3.0$  (режим НСД):

1 —  $p_{r,f}$ , 2 —  $p_{m,f}$ , 3 —  $p_{r,a1}$ , 4 —  $p_{r,a2}$ , 5 —  $p_{m,a}$ , 6 —  $p_{c30}$ , 7 —  $p_{c1}$ , 8 —  $p_{c3}$ , 9 — начало устойчивой НСД, 10 — смена режимов НСД с двухволнового на одноволновый

новых параметров процесса НСД представлено в табл. 1 (строка 2). Резкий подъем давления в КС, а после инициирующего импульса через 5 мс наблюдается возбуждение ПДВ. Поскольку истечение воздуха и горючего происходило из ресиверов конечного объема, то давление находящихся в них газов и, следовательно, расходы уменьшались со временем. Однако давление в ресиверах горючего в приведенном эксперименте спадало медленнее, чем в ресиверах воздуха, поэтому со временем происходил рост коэффициента избытка горючего —  $\phi = 0.91 \rightarrow 1.5$ .

Дальнейшее уменьшение площади выход-

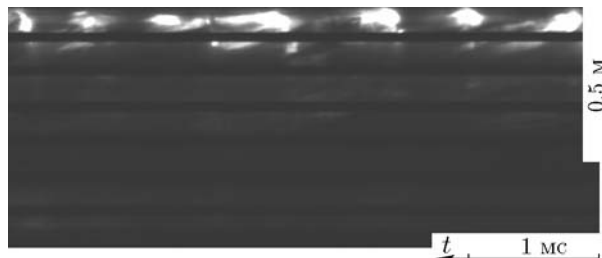


Рис. 5. Фрагмент фоторегистрограммы ПДВ в смеси  $\text{CH}_4/2\text{H}_2$  — воздух при  $K_{ex} = 1.77$  ( $G_a = 20.8$  кг/с,  $\phi = 1.01$ ,  $n = 2$ ,  $f = 1.34$  кГц,  $D = 1.06$  км/с)

ного сечения КС до  $K_{ex} = 1.77$  привело к реализации в диапазоне  $G_a = 2 \div 20.8$  кг/с и  $\phi = 1.01 \div 1.78$  только двухволновых режимов НСД с частотой вращения ПДВ  $f = 1.21 \div 1.34$  кГц. Характерный фрагмент фоторегистрограммы НСД приведен на рис. 5, а изменение основных параметров процесса НСД представлено в табл. 1 (строка 3). Отличительной особенностью структуры ПДВ в КС при  $K_{ex} = 1.77$  является уменьшение высоты фронта ПДВ до  $h \approx 12$  см, в то время как в КС при  $K_{ex} = 3.0$ ,  $G_a = 20.4$  кг/с,  $\phi = 0.95$  она составляла  $h \approx 20$  см. Объяснение находим в меньшей скорости смеси и увеличении давления в КС при большем перекрытии выходного сечения (уменьшении параметра  $K_{ex}$ ).

Итак, в ДК-500 для смеси  $\text{CH}_4/2\text{H}_2$  — воздух ( $m_{\text{H}} = 1/5$ ) при уменьшении площади выходного сечения КС до  $K_{ex} = 1.77$  впервые реализованы одноволновые и двухволновые режимы НСД.

## 2.2. Нижний предел НСД при уменьшении доли водорода $m_{\text{H}}$ в горючем

Далее в камере ДК-500 при фиксированном значении  $K_{ex} = 1.77$  была проведена серия экспериментов в смесях  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  — воздух с последовательным уменьшением массовой доли водорода  $m_{\text{H}}$ . Исследованы горючие следующие составы:  $\text{CH}_4 + \text{H}_2$  ( $m_{\text{H}} = 1/9$ ),  $\text{CH}_4 + 0.5\text{H}_2$  ( $m_{\text{H}} = 1/17$ ) и  $\text{CH}_4$  ( $m_{\text{H}} = 0$ ). Обобщающие экспериментальные данные представлены в табл. 2.

$\text{CH}_4 + \text{H}_2$  ( $m_{\text{H}} = 1/9$ ). Так же, как и для смеси  $\text{CH}_4/2\text{H}_2$  — воздух, наблюдали только двухволновые режимы НСД, которые существовали в области параметров:  $G_a = 1.95 \div 23.45$  кг/с,  $\phi = 0.78 \div 0.99$ ,  $f = 1.19 \div 1.38$  кГц. Структура волн и течение в их

Таблица 2

Параметры непрерывной спиновой детонации в ДК-500 при  $K_{ex} = 1.77$  в смесях метан/водород — воздух

$m_H$	$p_{m,a}/p_a$	$g_\delta$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	$\phi$	$f$ , кГц	$n$	$D$ , км/с	$p_{c3}/p_a$	$p_{c30}/p_a$	Режим
1/9	12.8 → 1.12	1513 → 126	0.99 → 0.78	1.34 → 1.19	2	1.06 → 0.94	6.91 → 0.95	10.4 → 1.17	НСД
1/17	9.8 → 1.5	1135 → 187	0.88 → 0.99	1.29 → 1.21	2	1.02 → 0.96	3.47 → 0.94	6.92 → 1.22	НСД
	1.5 → 1.12	187 → 126	0.99 → 1.0	—					
0	9.06 → 6.4	1308 → 993	0.94 → 1.05	1.45 → 1.29	2	1.14 → 1.02	4.69 → 3.27	8.15 → 5.77	Нерегулярная НСД
	6.4 → 4.16	993 → 684	1.05 → 1.15	1.24 → 1.19					
	4.16 → 1.18	684 → 153	1.15 → 1.52	—					

окрестности принципиально не отличались от приведенных на рис. 5, а осциллограммы давления в системе подачи и в КС — от изображенных на рис. 4. Значения параметров НСД приведены в табл. 2 (строка 1).

**CH<sub>4</sub> + 0.5H<sub>2</sub> ( $m_H = 1/17$ ).** В этой смеси с массовой долей водорода в горючем 6 % в диапазоне  $G_a = 2.9 \div 17.6$  кг/с при  $\phi = 0.88 \div 0.99$  также наблюдали двухволновые режимы НСД с частотой вращения ПДВ  $f = 1.21 \div 1.29$  кГц. При малых расходах воздуха  $G_a = 1.95 \div 2.9$  кг/с и  $\phi = 0.99 \div 1.0$  существовало обычное горение. Хотя структура ПДВ и была аналогична приведенной на рис. 5, но отличалась большей нерегулярностью. Осциллограммы давления были подобны приведенным на рис. 4. Основные параметры НСД даны в табл. 2 (строка 2).

**CH<sub>4</sub> ( $m_H = 0$ ).** И наконец, в опытах с чистым метаном впервые в диапазоне расходов воздуха  $G_a = 10.3 \div 15.4$  кг/с и  $\phi = 1.05 \div 1.15$  реализован двухволновый режим НСД с частотой вращения ПДВ  $f = 1.19 \div 1.24$  кГц. Изменение основных параметров процесса пред-

ставлено в табл. 2 (строка 3), а фрагмент фоторегистрограммы НСД приведен на рис. 6. Видно, что высота фронта ПДВ составляет  $h \approx 22$  см, а его структура нерегулярна. При  $G_a > 15.4$  кг/с наблюдали нерегулярный детонационный процесс, а при  $G_a < 10.3$  кг/с — горение с акустическими волнами.

Итак, в кольцевой камере ДК-500 при заужении выходного сечения КС до  $K_{ex} = 1.77$  для смесей CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> — воздух, CH<sub>4</sub>/0.5H<sub>2</sub> — воздух и CH<sub>4</sub> — воздух впервые реализованы режимы НСД.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### 3.1. Влияние геометрии КС на детонационный режим

Описанные выше опыты в камере ДК-500 для смеси CH<sub>4</sub>/2H<sub>2</sub> — воздух показывают (см. табл. 1), что заужение площади выходного сечения КС (уменьшение параметра  $K_{ex}$ ) обеспечивает переход от режима пульсирующей детонации к двухволновому режиму НСД. Последний при  $K_{ex} = 1.77$  существовал во всем исследованном диапазоне расходов воздуха  $G_a = 2 \div 20.8$  кг/с. Если в кольцевой цилиндрической камере ДК-500 ( $K_S = K_{ex}$ ) [4] НСД наблюдали лишь в смесях CH<sub>4</sub>/8H<sub>2</sub> — воздух и CH<sub>4</sub>/4H<sub>2</sub> — воздух, то при заужении площади выходного сечения КС до  $K_{ex} = 1.77$  (почти в три раза —  $K_S/K_{ex} = 2.96$ ) для близких значений  $g_\delta$  и  $\phi$  были реализованы режимы НСД с двумя ПДВ в смесях CH<sub>4</sub>/mH<sub>2</sub> — воздух ( $m = 2, 1, 0.5, 0$ ) (см. табл. 1, 2). Последнее означает, что при заужении выходного сечения КС (уменьшение параметра  $K_{ex}$  до 1.77) в бинарном горючем CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> нижний предел НСД по массовой доле водорода удается уменьшить

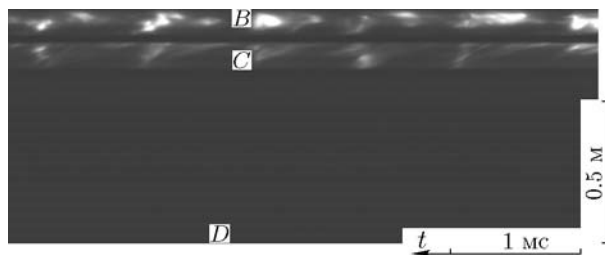


Рис. 6. Фрагмент фоторегистрограммы режима НСД смеси CH<sub>4</sub> — воздух при  $K_{ex} = 1.77$  ( $G_a = 13.86$  кг/с,  $\phi = 1.08$ ,  $n = 2$ ,  $f = 1.23$  кГц,  $D = 0.97$  км/с)

до  $m_H = 0$ , т. е. впервые получить режим НСД в смеси чистый метан — воздух.

### 3.2. Влияние геометрии КС на давление в камере и системе подачи

При заданном расходе смеси заужение КС на выходе повышает давление в КС и снижает перепад давления на щели подачи воздуха  $p_{c1}/p_{m,a}$ . Это отношение определяет гидравлические потери на щели подачи воздуха. Например, для горючего  $\text{CH}_4/2\text{H}_2$  и близких удельных расходов воздуха  $g_\delta \approx 1500 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  при  $K_{ex} = 3.0$  регистрировали  $p_{m,a} = 10.3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $p_{c1}/p_{m,a} = 0.61$ , а при  $K_{ex} = 1.77$  —  $p_{m,a} = 11 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $p_{c1}/p_{m,a} = 0.92$ . Более интересно поведение отношения  $p_{c30}/p_{m,a}$ , так как оно определяет одновременно гидравлические потери на щели и в КС. Зависимости  $p_{c30}/p_{m,a}$  от удельного расхода воздуха через щель  $g_\delta$  при детонационном сжигании смеси  $\text{CH}_4/2\text{H}_2$  — воздух и значениях  $K_{ex} = 5.23, 3.0$  и  $1.77$  приведены на рис. 7. Видно, что с увеличением степени заужения отношение  $p_{c30}/p_{m,a}$  растет: при  $K_{ex} = 1.77$  точки 3 расположены выше, чем точки 2 ( $K_{ex} = 3.0$ ) и точки 1 ( $K_{ex} = 5.23$ ). Резкое увеличение отношения  $p_{c30}/p_{m,a}$  происходит при выходе на докритическое истечение из КС, которое при  $K_{ex} = 5.23$  достигается для удельного расхода воздуха  $g_\delta \approx 800 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ , а при  $K_{ex} = 3.0$  и  $1.77$  для  $g_\delta \approx 400$  и  $250 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  соответственно. При критическом истечении из КС значения отношения  $p_{c30}/p_{m,a}$  практически постоянны: при  $K_{ex} = 5.23$  и  $3.0$  близки к  $p_{c30}/p_{m,a} \approx 0.7$ , а при  $K_{ex} = 1.77$  — к  $p_{c30}/p_{m,a} \approx 0.88$ .

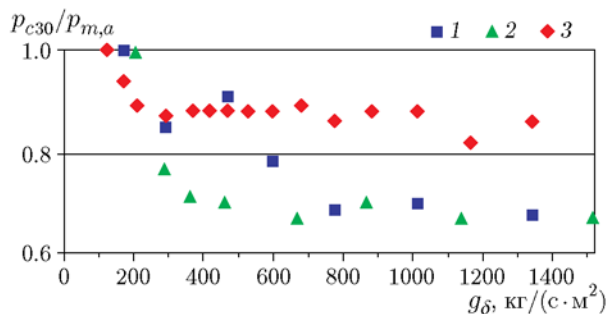


Рис. 7. Зависимость отношения  $p_{c30}/p_{m,a}$  от удельного расхода воздуха через щель:

1 —  $K_{ex} = 5.23$ , 2 —  $3.0$ , 3 —  $1.77$

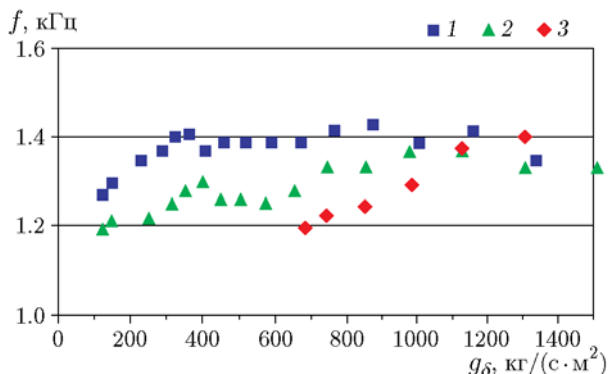


Рис. 8. Зависимость частоты ПДВ от удельного расхода воздуха в камере сгорания ДК-500 при  $K_{ex} = 1.77$  для различных составов горючего:

$\text{CH}_4/m\text{H}_2$ : 1 —  $m = 2$ , 2 —  $m = 1$ , 3 —  $m = 0$

### 3.3. Влияние химического состава топливовоздушной смеси на детонационный режим

Обобщающие зависимости частоты вращения ПДВ от удельного расхода воздуха для смесей  $\text{CH}_4/2\text{H}_2$  — воздух (точки 1),  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  — воздух (точки 2) и  $\text{CH}_4$  — воздух (точки 3) при  $K_{ex} = 1.77$  представлены на рис. 8. Видно, что в ДК-500 при  $K_{ex} = 1.77$  реализуются двухволновые режимы НСД с частотой вращения ПДВ  $f = 1.2 \div 1.4 \text{ кГц}$ . Причем уменьшение доли водорода в составе горючего приводит к уменьшению частоты вращения ПДВ от  $1.4$  до  $1.2 \text{ кГц}$ , а также к уменьшению области существования НСД по расходу  $g_\delta$ . Если для смеси  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  — воздух (кривая 2) режим НСД наблюдался при  $g_\delta \geq 126 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ , то для смеси метан — воздух (кривая 3) — при  $g_\delta \geq 710 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ .

### 3.4. Влияние химического состава топливовоздушной смеси на удельный импульс

В экспериментах измерялось давление торможения продуктов  $p_{c30}$  на выходе из КС, которое является важной интегральной характеристикой процесса детонационного сжигания топливовоздушных смесей. Обобщающие зависимости  $p_{c30}$  от удельного расхода воздуха при  $K_{ex} = 1.77$  для исследованных составов горючего  $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4 + \text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$  приведены на рис. 9. Видно, что при НСД с увеличением удельного расхода воздуха  $g_\delta$  полное давление  $p_{c30}$  растет практически линейно. При фиксированных значениях  $g_\delta$  давление  $p_{c30}$  монотонно снижается при уменьшении доли водорода в

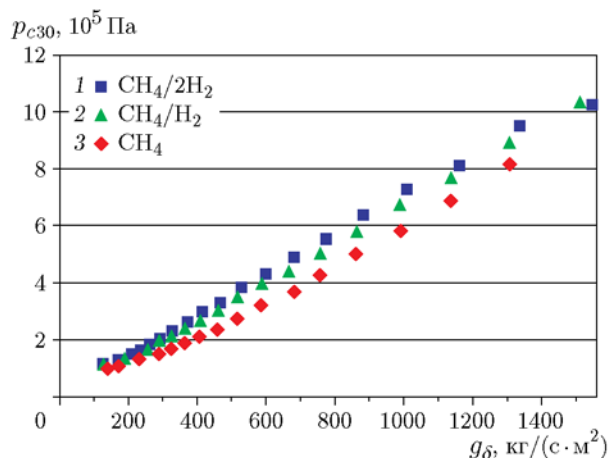


Рис. 9. Зависимость давления торможения на выходе из КС от удельного расхода воздуха при  $K_{ex} = 1.77$  для различных составов горючего

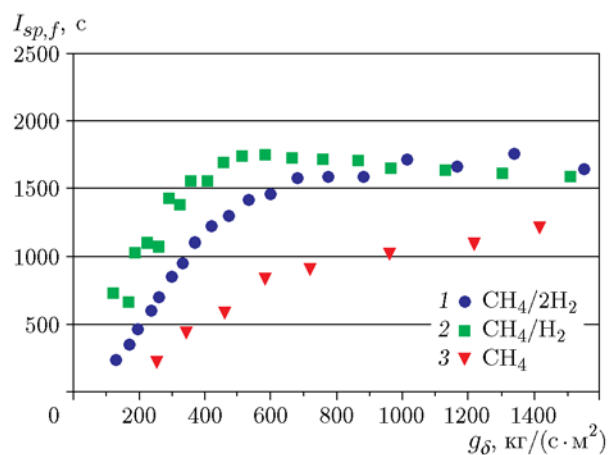


Рис. 10. Зависимость удельных импульсов от удельного расхода воздуха через щель при  $K_{ex} = 1.77$  для различных составов горючего

горючем. Наименьшие значения давления торможения на выходе из КС наблюдаются для чистого метана (точки 3).

При сжигании указанных выше горючих по измеренным значениям статического  $p_{c3}$  и полного  $p_{c30}$  давления на выходе из КС по методике, подробно изложенной в [5], определялись сила тяги «горячего» пуска  $F_h$ , сила тяги «холодного» пуска  $F_c$  и «чистые» удельные импульсы относительно горючего  $I_{sp,f} = (F_h - F_c)/G_f/g$ . Здесь  $G_f$  — расход горючего,  $g$  — ускорение свободного падения. То есть в настоящей работе, так же как и в [5], учитывалась энергия сжатых исходных компонентов в соответствующих ресиверах. На рис. 10

представлены зависимости удельных импульсов  $I_{sp,f}$  от удельного расхода воздуха через щель  $g_{\delta}$  при  $K_{ex} = 1.77$ . Видно, что значения  $I_{sp,f}$  растут с увеличением  $g_{\delta}$  и стабилизируются при критическом истечении продуктов из КС на уровне  $I_{sp,f} \approx 1600 \pm 100$  с (кривые 1, 2) и  $I_{sp,f} \approx 1200 \pm 100$  с (метан — воздух, кривая 3). Причем с увеличением содержания водорода в смеси удельный импульс растет. В опыте для смеси  $\text{CH}_4$  — воздух регистрируется ее явное недогорание, на что указывает положение кривой 3 на рис. 10, а также холодные стенки КС после проведения опыта. При обработке авторами данных работы [4] подобная тенденция регистрировалась и при детонационном сжигании смесей метан/водород — воздух в цилиндрической КС с  $\Delta = \text{const} = 18$  мм и подачей воздуха через зазор  $\delta = 3.5$  мм.

## ВЫВОДЫ

В проточной кольцевой камере сгорания ДК-500 при заужении выходного сечения КС до трех раз ( $K_{ex} = 1.77$ ) впервые реализованы одноволновые и двухволновые режимы непрерывной спиновой детонации с поперечными детонационными волнами в топливовоздушных смесях с горючим  $\text{CH}_4/2\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Для всех детонирующих составов горючего  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  определены нижние пределы существования детонации по удельному расходу смеси, а также по содержанию водорода в бинарном горючем.

Увеличение степени заужения КС на выходе до трех раз увеличивает отношение давления торможения продуктов на выходе к давлению в коллекторе воздуха до 0.88, т. е. уменьшает гидравлические потери.

По измерениям полного и статического давления на выходе из КС при  $K_{ex} = 1.77$  определены удельные импульсы при непрерывной детонации в зависимости от состава горючего  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ . Максимальное значение удельного импульса 1600 с получено для горючего  $\text{CH}_4/2\text{H}_2$ , а минимальное значение 1200 с — для горючего  $\text{CH}_4$ .

Итак, сжигание в режиме НСД самой трудно детонирующей смеси чистый метан — воздух в камере сгорания ДК-500 с заужением выходного сечения КС означает, что все газовые углеводородные топливовоздушные смеси с размерами детонационных ячеек меньшими, чем у смеси метан — воздух, могут детонировать в режиме непрерывной детонации.

## 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., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная детонация смесей метан/водород — воздух в кольцевой цилиндрической камере сгорания // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 4. — С. 96–106.
5. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Параметры непрерывной детонации смесей метан/водород — воздух при добавочной подаче воздуха в продукты сгорания // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 2. — С. 83–93.
6. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Самоподдерживающаяся пульсирующая детонация потока газовой смеси // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 4. — С. 99–106.

*Поступила в редакцию 07.10.2019.*

*После доработки 23.01.2020.*

*Принята к публикации 19.02.2020.*

---