

УДК 534.222.2,544.454.3

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАМЕРЫ НА РЕАЛИЗАЦИЮ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕЙ СИНТЕЗ-ГАЗ — ВОЗДУХ

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

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

В проточной кольцевой цилиндрической камере диаметром 306 мм исследованы режимы непрерывного детонационного сжигания смесей синтез-газ — воздух в поперечных (спиновых) детонационных волнах. Рассмотрены смеси оксида углерода и водорода в пропорциях 1/1, 1/2 и 1/3. Варьировались геометрия камеры и система подачи, а также расходы воздуха и синтез-газа и их соотношения. Определено влияние добавочной подачи воздуха в продукты на параметры детонационных волн, давление в камере и удельный импульс. Расширена область реализации непрерывной спиновой детонации смеси синтез-газ — воздух по удельным расходам смеси от 25 до 786 кг/(с·м²). Показано, что добавочная подача воздуха увеличивает давление в камере, тягу, число детонационных волн и снижает их скорость. Исследована структура течения в области детонационных волн. Для ряда значений коэффициента расширения камеры сгорания построена область реализованных режимов детонации в координатах «коэффициент избытка горючего — удельный расход воздуха», рассчитан удельный импульс силы тяги.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, синтез-газ, воздух, поперечные детонационные волны, камера сгорания, структура течения.

DOI 10.15372/FGV20150610

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и за рубежом ведется интенсивное теоретическое и экспериментальное изучение непрерывного детонационного сжигания топлива по схеме Б. В. Войцеховского (в поперечных детонационных волнах [1]). Обобщающий материал по развитию этого направления можно найти в книге [2]. Отметим, что первые успешные эксперименты по реализации в проточных кольцевых цилиндрических камерах сгорания непрерывной спиновой детонации (НСД) в топливовоздушных смесях (ТВС) были проведены для смесей C₂H₂ — воздух [3] и H₂ — воздух [4]. Для реализации НСД топливовоздушных смесей в камерах сгорания двигателей и стационарных энергетических установок перспективным топливом может быть синтез-газ, производство которого в настоящее время хорошо освоено [5, 6]. Ранее в проточной кольцевой цилиндрической

камере диаметром 306 мм были реализованы и определены условия существования НСД смесей синтез-газ — воздух при молярных соотношениях [CO]/[H₂] 1/1, 1/2 и 1/3 [7]. Для данной геометрии камеры и системы подачи компонентов смеси определены пределы существования НСД по коэффициенту избытка горючего (минимальные и максимальные значения) и по удельному расходу смеси (минимальные значения). Построена область реализации детонационных режимов в координатах этих переменных.

Цель настоящей работы — исследование влияния геометрических параметров камеры и добавочной подачи воздуха на реализацию НСД в смесях синтез-газ — воздух, а также влияния расхода компонентов смеси на расширение области существования НСД.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментальной установки приведена в работе [7], а камеры сгорания с добавочной подачей воздуха — на рис. 1. Кольцевой канал 1 камеры сгорания образован наружной стенкой диаметром $d_c = 306$ мм и внутренней стенкой, диаметр которой изменялся и,

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы Президиума РАН № 26.3 (§ 2.2), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-01-00178) (§ 2.3) и гранта Президента РФ (НШ-2695.2014.1).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Самсонов А. Н., 2015.

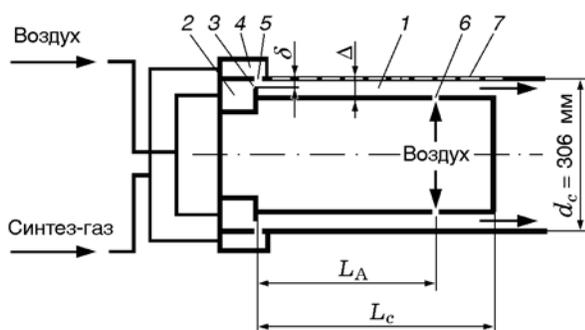


Рис. 1. Схема камеры сгорания

соответственно, изменялся зазор между стенками Δ с площадью проходного сечения камеры $S_c = \pi(d_c - \Delta)\Delta$. Длина камеры L_c регулировалась длиной внутренней стенки. Основная подача воздуха в камеру сгорания проводилась из кольцевого коллектора 2 через кольцевую щель 3 шириной δ с площадью проходного сечения щели $S_\delta = \pi(d_c - \delta)\delta$, а подача двухкомпонентного горючего синтез-газа — из коллектора 4 через форсунку 5. Параметры форсунки аналогичны приведенным в работе [7]. В части опытов осуществлялась добавочная подача воздуха в камеру со стороны ее внутренней стенки на расстоянии L_A от торца камеры через кольцевую щель 6 шириной 3.0 мм. НСД исследовалась в камерах сгорания (А1) с различными коэффициентами расширения камеры $K_S = S_c/S_\delta$ (табл. 1).

Воздух основной подачи поступал в коллектор 2 из ресивера объемом $V_{r,a1} = 43.3$ л, а добавочной подачи — в щель 6 из ресиверов

$V_{r,a2} = 41.6$ или 10.3 л. Синтез-газ подавался в коллектор 4 из ресивера $V_{r,f} = 13.3$ л (на рис. 1 ресиверы и соответствующие клапаны не показаны). Способ перемешивания в ресивере оксида углерода и водорода подробно описан в [7] и здесь не приводится.

Начальное давление в ресиверах варьировалось в пределах: горючего — $p_{r,f} = (60.8 \div 8.1) \cdot 10^5$ Па, воздуха в основной и добавочной системах подачи — $p_{r,a1} = (50.6 \div 4.6) \cdot 10^5$ Па и $p_{r,a2} = (54.6 \div 25.2) \cdot 10^5$ Па соответственно. В результате начальный расход компонентов смеси изменялся в диапазонах: синтез-газа — $G_f = 1.46 \div 0.105$ кг/с, воздуха — $G_{a1} = 6.57 \div 0.6$ кг/с и $G_{a2} = 6.14 \div 0$ кг/с ($\alpha = G_{a2}/G_{a1} = 1.2 \div 0$). В течение опыта, который длился около 0.8 с, расходы воздуха в основной и добавочной системах подачи при $V_{r,a2} = 41.6$ л уменьшались примерно в 7.5 раз, а их отношение α практически не изменялось. При дополнительной подаче воздуха из ресивера объемом $V_{r,a2} = 10.3$ л его истечение в камеру заканчивалось через 0.45 с. Расход синтез-газа за время эксперимента в зависимости от его состава и способа подачи в коллектор (через один трубопровод или через два) уменьшался в 6 \div 10 раз. Для приведенных расходов воздуха и синтез-газа коэффициент избытка горючего в области основной подачи воздуха составлял $\phi_1 = 1.25 \div 0.5$, а с учетом добавочной подачи — $\phi_\Sigma = \phi_1/(1 + \alpha) = 7 \div 0.2$. Удельный расход воздуха через щель основной системы подачи варьировался в разных опытах в диапазоне $g_\delta = G_{a1}/S_\delta = 120 \div 1752$ кг/(с \cdot м²), расход исследованных ТВС — в диапазоне $g_\Sigma = (G_{a1} + G_{a2} + G_f)/S_c = 25 \div 786$ г/(с \cdot м²). Расход компонентов смеси определяли по методике [2]. Для увеличения удельного расхода ТВС [7] в тракте подачи синтез-газа были устранены дополнительные гидравлические сопротивления, уменьшавшие расход газа: увеличено проходное сечение трубопроводов и убрана задвижка перед клапаном горючего. При этом удалось выровнять изменение коэффициента ϕ_1 в течение эксперимента. Иницирование детонации образующейся в камере ТВС осуществлялось пережиганием полоски алюминиевой фольги с выделением энергии ≈ 5 Дж на расстоянии 150 мм от переднего торца камеры (на рис. 1 не показано). Время иницирования было согласовано с моментом подачи в камеру сгорания воздуха основной подачи. Истечение

Таблица 1
Линейные размеры камер сгорания А1
диаметром $d_c = 306$ мм

Камера сгорания	δ , мм	Δ , мм	K_S	L_c , мм	L_A , мм
А10	3	23	7.161	585	—
А1				155	120
А20	3	16.5	5.255	525	—
А2				525	370
А30	6	23	3.616	585	—
А3				585	465
А40	6	16.5	2.654	525	—
А4				525	370

продуктов сгорания, так же как в [7], осуществлялось в окружающую среду с давлением $p_a = 10^5$ Па.

Процесс в камере сгорания фотографировался высокоскоростной камерой Photron Fastcam SA1.1 675K-M3 через продольные окна из оргстекла 7, расположенные друг за другом вдоль стенки камеры (см. рис. 1). Ширина каждого окна 8 мм, длина 45 мм. Расстояние между окнами 15 мм. Размеры окон являлись масштабом происходящих процессов. По специальной программе, написанной на языке C++, фотографии соединялись, при этом из 16 пикселей по ширине окна выбирался только один. При выборе 2–3 пикселей картина течения получалась более дискретной и размытой. Поскольку кадры видеосъемки имели сдвиг по времени, то реализовывалась x, t -диаграмма светящихся продуктов, движущихся вдоль окна камеры. Светящиеся объекты, движущиеся в тангенциальном направлении, фиксировались с некоторым искажением, которое легко можно устранить (хотя и с потерей отчетливости изображения) выравниванием масштабов в осевом и тангенциальном направлениях. Таким образом, получается действительная картина течения в системе волны. При установке режима съемки 400 000 кадр/с структура течения регистрировалась достаточно отчетливо, несмотря на то, что за время экспозиции (не более 2.5 мкс) светящиеся объекты двигались относительно неподвижного фотоэлемента видеокамеры (см. ниже рис. 2).

При реализации НСД по фоторегистрограммам определялось время появления поперечных детонационных волн (ПДВ) против окна Δt , которое позволяет однозначно находить частоту их вращения f и скорость НСД D по формулам

$$f = 1/\Delta t, \quad D = \pi \langle d_c \rangle / (n \Delta t). \quad (1)$$

Здесь $\langle d_c \rangle = d_c - \Delta$ — средний диаметр кольцевого канала камеры, n — число ПДВ вдоль окружности камеры.

Давление в ресиверах воздуха и горючего ($p_{r,a1}, p_{r,a2}, p_{r,f}$), их коллекторах ($p_{m,a1}, p_{m,a2}, p_{m,f}$), а также статическое (p_{c1}, p_{c2}, p_{ex}) и полное (p_{ex0}) давление в камере сгорания регистрировалось на расстоянии 15, 100 мм от переднего торца камеры (p_{c1}, p_{c2}) и вблизи ее выхода ($p_{ex} = p_{c3}$ и $p_{ex0} = p_{c30}$). Использовались датчики давления типа S-10 фирмы «ВИКА» с темпом роста амплитуды сигнала 90 % за

1 мс. Регистрация давления и фотоизображений, а также их обработка проводились с помощью компьютера.

Заметим, что в экспериментах НСД в камере сгорания наблюдалась при монотонно уменьшающихся расходах компонентов воздуха и синтез-газа. Характерное время оборота ПДВ в кольцевой камере составляло ≈ 1 мс. За это время изменение давления и расхода смеси составляло всего десятые доли процента. То есть детонационный процесс в камере в каждый момент времени можно считать квазистационарным. Поэтому можно утверждать, что в длительных стационарных экспериментах при фиксированном удельном расходе g_δ и заданном составе топлива ϕ_1 стационарный режим НСД в данной камере будет иметь такие же значения частоты вращения НСД, полного давления на выходе из камеры и удельного импульса.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для четырех типов камеры сгорания АІ (см. табл. 1) в области указанных выше параметров подачи компонентов смеси были осуществлены режимы непрерывного детонационного сжигания смеси синтез-газ — воздух в ПДВ для трех исследуемых составов горючего: $\text{CO} + \text{H}_2$, $\text{CO} + 2\text{H}_2$, $\text{CO} + 3\text{H}_2$. Варьировали геометрические параметры камеры (δ, Δ) и параметры подачи компонентов ТВС (G_{a1}, G_f, G_{a2}), т. е. в данной серии экспериментов варьировали четыре независимых параметра $g_\delta, K_S, \phi_1, \alpha$. Удельный расход исследуемых ТВС может быть определен как комбинация этих параметров по формуле

$$g_\Sigma = g_\delta(1 + \phi_1/L_0 + \alpha)/K_S. \quad (2)$$

Здесь $L_0 = G_{a1}/G_{f,st}$ — стехиометрический коэффициент, $G_{f,st}$ — расход горючего, соответствующий стехиометрическому соотношению с воздухом. Поскольку для каждой ТВС коэффициент L_0 имеет одно определенное значение, то при варьировании видов ТВС появляется еще пятый независимый параметр L_0 . Например, для смеси с синтез-газом состава $\text{CO} + \text{H}_2$ $L_0 = 4.576$, для состава $\text{CO} + 2\text{H}_2$ $L_0 = 6.435$ и для $\text{CO} + 3\text{H}_2$ $L_0 = 8.075$.

Изложим результаты экспериментов в порядке увеличения молярной доли водорода в составе синтез-газа.

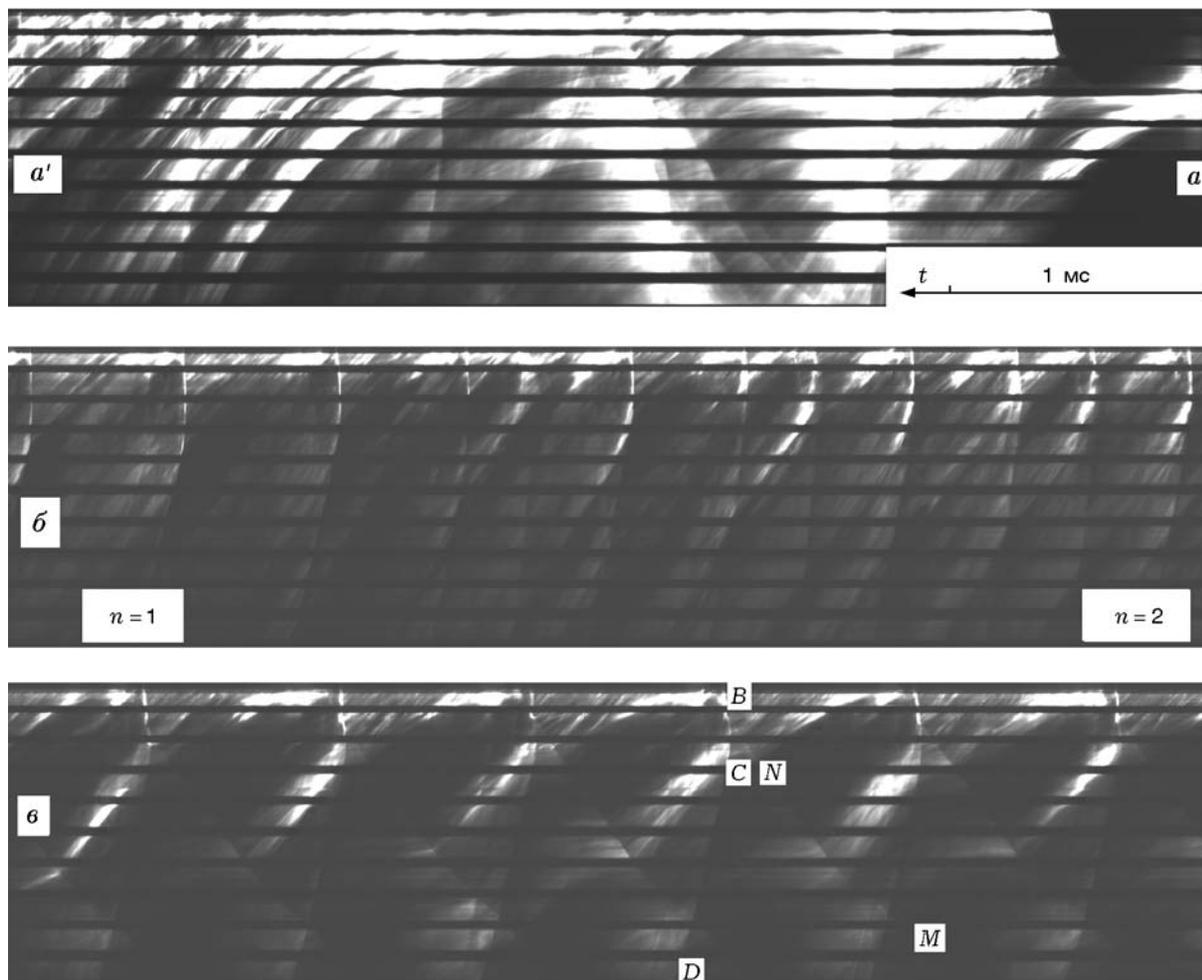


Рис. 2. Фоторегистрограммы зарождения ПДВ и их развитие в смеси $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{воздух}$:
a — после инициирования (яркая вспышка справа, $t = 0$), *б* — переход от двух волн к одной ($t = 22.4$ мс),
в — ПДВ под влиянием противодействия ($t = 410$ мс)

2.1. Синтез-газ состава $\text{CO} + \text{H}_2$

На рис. 2 приведены характерные фрагменты фоторегистрограмм процесса инициирования и зарождения ПДВ (*a*), уменьшения их количества ($n = 2 \rightarrow 1$) (*б*) и воздействия противодействия среды (*в*), полученные в камере А10 ($K_S = 7.16$, $L_c = 585$ мм, $G_{a2} = 0$) для смеси $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{воздух}$. Видно (рис. 2, *a*), что после инициирования ($t = 0$) в течение 0.5 мс от области воспламенения сформировалась продольная детонационная волна, достигшая переднего торца камеры. Эта волна, отраженная в виде ударной, на расстоянии 12 см (два верхних окна) засвечена продуктами детонации, поэтому практически не видна. Она проявилась только в третьем окне в области несгоревшей смеси. Вторая, почти вертикаль-

ная волна — это выродившаяся в ударную детонационную волну, сформированная источником инициирования в тангенциальном направлении. Она совершила пробег по окружности камеры и в области окна двигалась по продуктам горения и детонации. В камеру заходили и ударные волны, сформировавшиеся при детонации смеси, скопившейся за пределами камеры. После затухания первичных волн восстанавливалось течение в камеру воздуха и горючего из системы подачи, а возмущения в тангенциальном направлении формировали две ПДВ. На рис. 2, *a* значения параметров разделены: *a* — непосредственно перед инициированием ($t = 0$), *a'* — через 4.5 мс после инициирования процесса и начала зарождения ПДВ.

В момент времени $t = 22.4$ мс ($g_\delta = 1.058$ кг/(с·м²), $g_\Sigma = 167$ кг/(с·м²), $\phi_1 = 0.89$)

Таблица 2

Параметры НСД в ТВС с горючим CO + H₂ в различные моменты времени

Камера сгорания	Позиция на рис. 2	t , мс	α	g_{Σ} , кг/(с·м ²)	ϕ_1	$p_{m,a1}$	p_{c1}	p_{c30}	D , км/с	n
						10 ⁵ Па				
A10	a	0	—	178	0.9	3.62	0.69	1.15	—	—
	a'	4.5	—	177	0.9	5.0	2.4	3.0	1.34	2
	b	22.4	—	167	0.89	4.0	1.77	1.88	1.27 → 1.49	2 → 1
	b	410	—	58.8	0.92	1.81	1.07	1.07	1.18	1
A2	—	40	1.103	696	1.05	9.1	7.8	7	1.17	4
A1	—	230	0.836	27.5	0.83	1.12	1.0	1.02	—	—

на двух оборотах волны (≈ 1.5 мс) из двух ПДВ осталась одна (см. рис. 2, б). Она существовала до окончания регистрации процесса ($t = 800$ мс), ее частота и скорость монотонно уменьшались: $f = 1.68 \rightarrow 1.26$ кГц, $D = 1.49 \rightarrow 1.12$ км/с. По мере истечения компонентов смеси из ресиверов уменьшались и удельные расходы: $g_{\delta} = 1057 \rightarrow 143$ кг/(с·м²), $g_{\Sigma} = 167 \rightarrow 25$ кг/(с·м²), а коэффициент избытка горючего возрастал: $\phi_1 = 0.89 \rightarrow 1.12$.

На рис. 2, в показана структура ПДВ под влиянием противодействия при $t = 410$ мс ($g_{\delta} = 350$ кг/(с·м²), $g_{\Sigma} = 58.8$ кг/(с·м²), $\phi_1 = 0.92$). Здесь BC — фронт ПДВ, движущийся слева направо со скоростью D , CD — шлейф (ударная волна в продуктах, примыкающая к фронту), MN — вошедший в камеру скачок давления из внешней среды. На зафиксированном течении в системе волны скачки MN выглядят стационарными косыми, а в неподвижной системе координат перемещаются вдоль камеры с частотой, синхронной с частотой вращения ПДВ. Основные газодинамические параметры режимов, изображенных на фрагментах a – b и осредненных за период длительности фрагмента ($t = 4.5$ мс), даны в табл. 2.

Осциллограммы давления в системе подачи и в камере сгорания для рассмотренного режима приведены на рис. 3. Начало инициирования детонации соответствует резкому повышению давления в камере (в непосредственной близости от позиции a). Осциллограмма давления p_{c1} имеет большую высокочастотную составляющую, и она скрыла осциллограмму p_{ex0} , которая проходит примерно по осредненной кривой p_{c1} . Перед инициированием в месте установки датчика давление p_{c1} меньше давлений в камере p_{c2} , p_{ex} и p_{ex0} и даже мень-

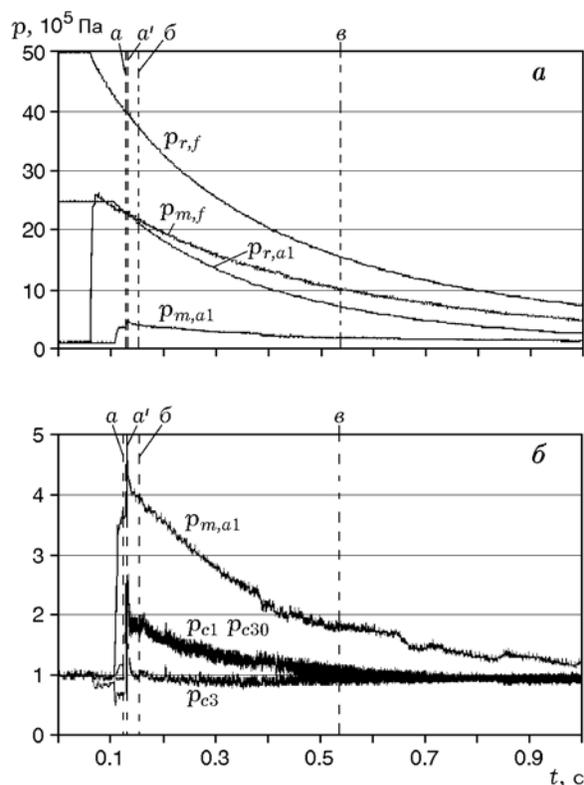


Рис. 3. Осциллограммы изменения давления: a — в системе подачи компонентов смеси, b — в камере сгорания A10 и коллекторе воздуха

ше атмосферного, что указывает на струйное течение смеси в этой области. С появлением непрерывной детонации в камере возрастало и давление в коллекторе воздуха $p_{m,a1}$.

Расход $G_{a2} = 0$. Процесс НСД в камере A10 ($K_S = 7.16$) достаточно полно рассмотрен выше. Добавим, что в этой камере зарегистрирован нижний предел для непрерывной дето-

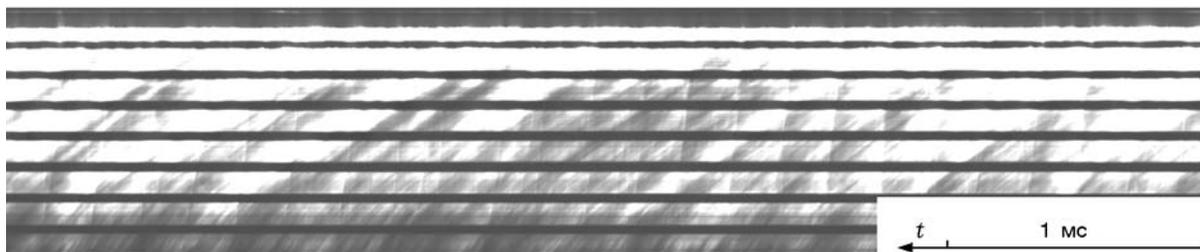


Рис. 4. Фоторегистрограмма НСД с четырьмя ПДВ ($D = 1.17$ км/с) при $G_2 > 0$ ($\alpha = 1.103$) в камере А2

нации по удельному расходу ТВС — $g_{\Sigma \min} \approx 25$ кг/(с·м²).

В камере А20 ($K_S = 5.255$) за счет более высокого давления в ресиверах горючего и воздуха, а также за счет сужения кольцевого канала камеры до $\Delta = 16.5$ мм удалось увеличить удельный расход ТВС, при котором реализованы ПДВ, до $g_{\Sigma} = 440$ кг/(с·м²), т. е. в 2.2 раза по сравнению с [7]. При этом удвоилось число ПДВ ($n = 2$) и выросла максимальная скорость непрерывной детонации до $D = 1.49$ км/с. Переходный процесс с уменьшением числа ПДВ до одной был продолжительным — около 37 мс. Заметим, что достигнутый удельный расход $g_{\Sigma} = 440$ кг/(с·м²) не является предельным для реализации НСД, просто технические возможности экспериментальной установки не позволили осуществить дальнейшее его увеличение.

В камере А40 ($K_S = 2.654$) с увеличением ширины щели для подачи воздуха вдвое ($\delta = 6$ мм) ухудшилось смесеобразование. Поэтому при тех же абсолютных расходах уменьшилось число ПДВ до минимума ($n = 1$) с нарушением их регулярной структуры и постоянства скорости $D = 1.1 \pm 0.2$ км/с. Давление в камере p_{c1} осталось таким же, как в камере А20, а давление в коллекторе $p_{m,a1}$ уменьшилось всего в 1.5 раза вследствие дозвукового истечения воздуха через щель.

Расход $G_{a2} > 0$. При добавочной подаче воздуха в камере А2 ($K_S = 5.255$) на расстоянии $L_A = 370$ мм от ее входа параметры менялись в диапазонах $g_{\Sigma} = 786 \rightarrow 42$ кг/(с·м²), $\alpha = 1.11 \rightarrow 0$. Причем при $g_{\Sigma} = 786$ кг/(с·м²) давление в камере равнялось $p_{c1} = 7.8 \cdot 10^5$ Па, число волн НСД — $n = 4$, а скорость и структура ПДВ были очень неустойчивы — $D = 1.2 \pm 0.2$ км/с. Интенсифицировалось обычное горение в области смесеобразования (рис. 4). ПДВ приобрели устойчивость лишь в двухволновом

режиме при $\alpha < 0.33$ ($g_{\Sigma} < 203$ кг/(с·м²)). С дальнейшим уменьшением g_{Σ} в течение опыта число волн уменьшалось ($n = 2 \rightarrow 1$), а их скорость оставалась близкой к $D \approx 1.1 \pm 0.1$ км/с. При этом переходный процесс со сменой количества волн был достаточно продолжительным — около 40 мс. В опытах, в которых воздух подавался из ресивера объемом $V_{r,a2} = 41.6$ л, отношение α изменялось незначительно — $\alpha = 1.11 \rightarrow 1.16$. При этом во всем диапазоне g_{Σ} наблюдались неустойчивые по структуре и частоте ПДВ. Отметим, что с увеличением параметра α давление в камере возрастало более, чем в $1 + \alpha$ раз, что приводило к дозвуковому истечению воздуха через щель и увеличению давления в коллекторе, но в меньшей пропорции.

При уменьшении длины камеры сгорания до $L_c = 155$ мм (камера А1) и при $G_{a2} > 0$ наблюдалось обычное горение, периодически усиливавшееся с приходом продольных волн сжатия извне с частотой $f_l = 1.32$ кГц. Из-за достаточно низких удельных расходов компонентов смеси истечение воздуха из коллектора и продуктов горения в камере было дозвуковым.

Зависимости частоты вращающихся ПДВ f от определяющего параметра — удельного расхода воздуха через кольцевую щель g_{δ} для ряда камер сгорания типа А1 представлены на рис. 5. Заметим, что коэффициент избытка горючего ϕ_1 в данной серии опытов изменялся в небольших пределах $\phi_1 = 1 \pm 0.2$.

Видно, что вблизи нижнего предела для НСД по $g_{\delta} \approx 120$ кг/(с·м²) во всех камерах частота ПДВ составляет $f = 1.1 \pm 0.1$ кГц при $n = 1$. С ростом параметра g_{δ} она постепенно растет, изменяясь скачком с увеличением числа ПДВ. При этом наблюдается следующая закономерность в поведении частоты НСД: переход от одноволнового детонационного режима к двухволновому сначала происхо-

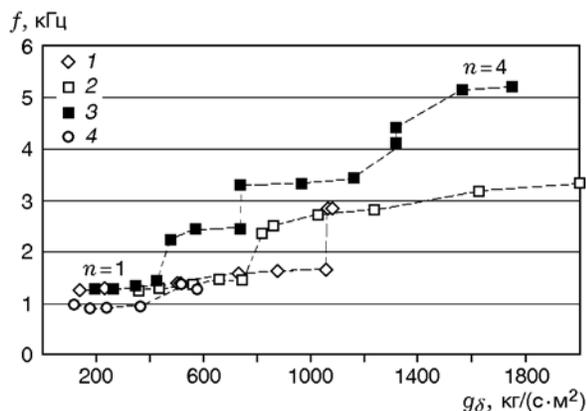


Рис. 5. Частота ПДВ в различных камерах сгорания в зависимости от удельного расхода воздуха через кольцевую щель при использовании в смеси синтез-газа состава $\text{CO} + \text{H}_2$: 1 — камера A10, 2 — A20, 3 — A2, 4 — A40

дит в камере A2 ($K_S = 5.255$, $G_{a2} > 0$, $g_\delta = 448 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $f = 2.25 \text{ кГц}$), затем в камере A20 ($K_S = 5.255$, $g_\delta = 750 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $f = 2.35 \text{ кГц}$) и наконец в камере A10 ($K_S = 7.161$, $g_\delta = 1059 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $f = 2.86 \text{ кГц}$). Отметим, что в камере A2 ($G_{a2} > 0$) переход от $n = 2$ к нерегулярным волнам $n = 3$ получен уже при $g_\delta = 739 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ с частотой ПДВ $f = 3.3 \text{ кГц}$. Объяснение наблюдаемой закономерности будет дано при анализе результатов. Максимальное число нерегулярных ПДВ $n = 4$ с частотой $f = 5.2 \text{ кГц}$, реализованное в ТВС с синтез-газом состава $\text{CO} + \text{H}_2$, наблюдали в камере A2 при $g_\delta = 1752 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

В камере A40 ($K_S = 2.654$) кольцевая струя воздуха в щели вдвое шире, скорость ее истечения в камеру меньше, чем в рассмотренных выше камерах, поэтому условия для перемешивания менее благоприятные для реализации режимов НСД. В исследованном диапазоне $g_\delta = 121 \div 577 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ была реализована одна ПДВ с меньшей скоростью, чем в камерах A10 и A20 при этих же значениях удельного расхода воздуха.

Таким образом, в перечисленных выше камерах сгорания диаметром 306 мм для ТВС с синтез-газом состава $\text{CO} + \text{H}_2$ при $g_\delta > 120 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ удалось реализовать одноволновую и многоволновую НСД. С ростом удельного расхода воздуха через кольцевую щель g_δ число ПДВ монотонно увеличивается. При этом значительное влияние на регулярность ПДВ оказывает количество добавляемого воз-

духа. В наших опытах при $\alpha > 0.33$ уже реализуются нерегулярные волны.

2.2. Синтез-газ состава $\text{CO} + 2\text{H}_2$

С горючим этого состава опыты проводили в камерах A1, A20 и A2, а также A40. Камеры A20, A2, A40 выбраны для сравнения с НСД в смеси $\text{CO} + \text{H}_2$, а камера A1 — для реализации в ней НСД, в которой для смеси $\text{CO} + \text{H}_2$ наблюдали только режим пульсирующей детонации. Для того чтобы проследить влияние добавочной подачи воздуха на НСД, его подавали из ресивера объемом $V_{r,a2} = 10.3 \text{ л}$.

Ввиду большей химической активности смеси $\text{CO} + 2\text{H}_2 + \text{воздух}$ во всех перечисленных камерах были реализованы режимы НСД с ПДВ, а наиболее устойчивые — в камере A20 (прототип работы [7]) в пределах $g_\Sigma = 276 \rightarrow 40 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $D = 1.5 \rightarrow 1.33$ ($n = 2$) и $1.55 \rightarrow 1.26 \text{ км}/\text{с}$ ($n = 1$) и $n = 2 \rightarrow 1$. Характер иницирования НСД и структура ПДВ были аналогичны приведенным на рис. 2.

В камере A2 в диапазонах $g_\Sigma = 615 \rightarrow 226 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и $\alpha = 1.8 \rightarrow 0.674$, как и для смеси $\text{CO} + \text{H}_2$ (см. рис. 5), число волн множилось до $n = 5 \div 6$ ($f = 6 \div 7 \text{ кГц}$) с изменением структуры и уменьшением скорости. Две устойчивые ПДВ со скоростью детонации $D = 1.355 \text{ км}/\text{с}$ наблюдали только при $\alpha < 0.674$ и $g_\Sigma < 226 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. По мере уменьшения α скорость этих волн возрастала до $D = 1.41 \text{ км}/\text{с}$ ($\alpha = 0.333$, $g_\Sigma = 148 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$), затем уменьшалась до $D = 1.26 \text{ км}/\text{с}$ ($\alpha = 0.265$, $g_\Sigma = 114 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$) с переходом в одноволновую ПДВ со скоростью $D = 1.425 \text{ км}/\text{с}$ ($\alpha = 0.22$, $g_\Sigma = 92 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$), которая существовала до конца фоторегистрации процесса — $D = 1.226 \text{ км}/\text{с}$ ($\alpha = 0$, $g_\Sigma = 36.1 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$). Следует отметить, что истечение добавочного воздуха ($\alpha = 0$) прекратилось при $g_\Sigma = 57 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

В короткой камере A1 при $g_\Sigma = 282 \rightarrow 125 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и $\alpha = 4.83 \rightarrow 2.39$ существовали нерегулярные по скорости и структуре ПДВ, которые переходили в устойчивое состояние при небольших значениях $g_\Sigma = 125 \rightarrow 36.6 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, но достаточно высоких значениях $\alpha = 2.39 \rightarrow 0.77$. Однако, в отличие от длинной камеры A2, реализовывались одноволновый режим со скоростями ПДВ $D = 1.15 \div 1.25 \text{ км}/\text{с}$. В диапазоне $g_\Sigma = 15 \div 8.5 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ($\alpha = 0$) режим горения был пульсирующий с частотой продольных волн

$f_1 \approx 1.36$ кГц, аналогично как это происходило в такой же камере в смеси $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{воздух}$. В диапазоне $g_\Sigma = 36.6 \rightarrow 15$ кг/(с·м²) ($\alpha = 0.77 \rightarrow 0$) существовали как поперечные, так и продольные детонационные волны. При этом более высокие скорости наблюдали на нескольких оборотах волны в начале эксперимента ($g_\Sigma = 277 \rightarrow 200$ кг/(с·м²)), а низкие $D = 1.0 \pm 0.2$ км/с — в конце ($g_\Sigma = 200 \rightarrow 40$ кг/(с·м²)). Влияние ширины щели для подачи воздуха и его добавочной подачи на давление в камере и коллекторе воздуха было аналогично рассмотренному выше для смеси $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{воздух}$.

На рис. 6 представлены зависимости частоты вращения ПДВ от удельного расхода воздуха через щель для состава горючего $\text{CO} + 2\text{H}_2$. Как и для смеси $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{воздух}$, вблизи нижнего по $g_\delta \approx 100$ кг/(с·м²) предела НСД в камерах А20, А2, А1 частота ПДВ составляет $f = 1.2 \pm 0.1$ кГц при $n = 1$. С ростом параметра g_δ она постепенно растет, изменяясь скачком с увеличением числа ПДВ.

Переход от одноволнового детонационного режима к двухволновому сначала происходит в камере А2 ($K_S = 5.255$, $g_\delta = 355$ кг/(с·м²), $f = 1.57$ кГц, $\alpha = 0.22$), затем в камере А20 ($g_\delta = 561$ кг/(с·м²), $f = 1.84$ кГц). Этот переходный процесс со сменой числа волн достаточно длительный — около 75 мс в камере А2 и 190 мс в камере А20. В камере А2 переход от $n = 2$ к нерегулярным волнам $n = 5 \div 6$ получен

при $g_\delta = 655$ кг/(с·м²), $\alpha = 0.674$ с частотой ПДВ $f = 2.98$ кГц. Причем переход произошел достаточно быстро — через десяток миллисекунд. Максимальное число нерегулярных ПДВ $n = 6$ с частотой $f = 6$ кГц, реализованное в ТВС с синтез-газом состава $\text{CO} + 2\text{H}_2$, наблюдали в камере А2 при $g_\delta = 960$ кг/(с·м²) и $\alpha = 1.8$. Диапазон $g_\delta = 670 \div 960$ кг/(с·м²) включает в себя весь спектр частот от 5 до 6 кГц, поэтому на рис. 6 приведены только крайние точки этого спектра.

В камере А40 ($K_S = 2.654$) кольцевая струя воздуха в щели вдвое шире, чем в рассмотренных камерах. Поэтому, как и для смеси $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{воздух}$, условия для перемешивания менее благоприятные для реализации режимов НСД. В результате в диапазоне $180 < g_\delta < 650$ кг/(с·м²) была реализована одна ПДВ, однако с меньшей скоростью, чем в камерах А1, А2 и А20 в том же диапазоне g_δ .

Таким образом, в перечисленных выше камерах сгорания диаметром 306 мм для ТВС с синтез-газом состава $\text{CO} + 2\text{H}_2$ при $g_\delta > 113$ кг/(с·м²) удалось реализовать одноволновую и многоволновую НСД. С ростом удельного расхода воздуха через кольцевую щель число ПДВ увеличивается. При этом значительное влияние на регулярность ПДВ оказывает количество добавляемого воздуха. В длинной камере А2 регулярные ПДВ реализованы при $\alpha < 0.674$ (большем, чем для смеси $\text{CO} + \text{H}_2$), а в короткой камере А1 этот верхний предел удалось повысить до $\alpha = 2.39$. Нижний предел $\alpha = 0.77$, после которого начинается продольная пульсирующая детонация, обусловлен, по видимому, низким расходом топливной смеси.

2.3. Синтез-газ состава $\text{CO} + 3\text{H}_2$

Эксперименты с этим горючим проводили как без добавочной подачи воздуха ($G_{a2} = 0$, камеры А10–А40), так и с ней ($G_{a2} > 0$, камеры А1–А3). Для добавочной подачи воздуха во всех опытах использовали ресивер объемом $V_{r,a2} = 10.3$ л.

Как и следовало ожидать, основываясь на результатах предыдущих исследований [7], устойчивые режимы НСД наблюдали во всех камерах с некоторыми индивидуальными особенностями. Большая химическая активность смеси $\text{CO} + 3\text{H}_2 + \text{воздух}$ позволила расширить пределы детонации по удельному расходу ТВС g_Σ , осуществить устойчивую НСД в ко-

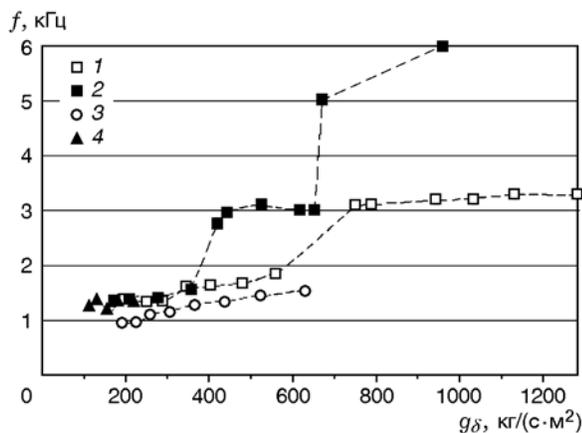


Рис. 6. Частота ПДВ в различных камерах сгорания в зависимости от удельного расхода воздуха через кольцевую щель при использовании в смеси синтез-газа состава $\text{CO} + 2\text{H}_2$: 1 — камера А20, 2 — А2, 3 — А40, 4 — А1

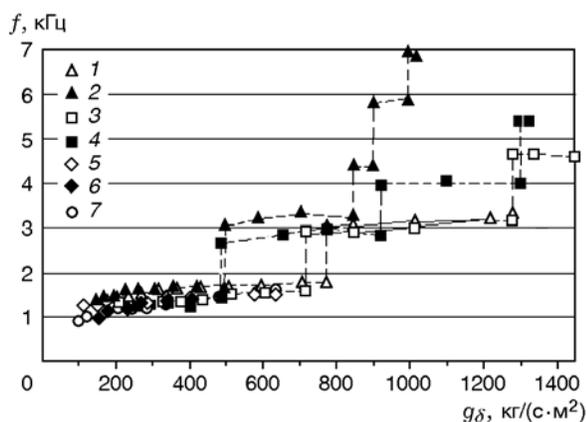


Рис. 7. Частота ПДВ в различных камерах сгорания в зависимости от удельного расхода воздуха через кольцевую щель при использовании в смеси синтез-газа состава $\text{CO} + 3\text{H}_2$: 1 — камера A10, 2 — A1, 3 — A20, 4 — A2, 5 — A30, 6 — A3, 7 — A40

роткой камере A3 с широкой щелью для подачи воздуха. Иницирование НСД и структура ПДВ аналогичны приведенным на рис. 2. Зависимость частоты вращения ПДВ f от удельного расхода воздуха через щель g_δ представлена на рис. 7. Значениям g_δ слева соответствуют режимы с одной волной, а при их возрастании каждый резкий подъем по частоте соответствует увеличению числа волн на единицу.

За счет большей химической активности смеси возросло количество ПДВ как без добавочной подачи воздуха, так и с добавочной. В камере A20 при максимально достигнутом значении $g_{\delta, \max} = 1447 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ наблюдали три ПДВ, а при добавочной подаче воздуха (камера A2) число волн возросло на единицу ($n = 4$). Наибольшее количество ПДВ реализовано в камере A1 — $n = 5$ ($f \approx 7 \text{ кГц}$). При этом отношение расхода добавочного воздуха к основному составляло $\alpha = 1.73$. Переход к одноволновому режиму происходил при меньших значениях $\alpha = 0.15$, но больших $g_\delta \approx 500 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ по сравнению с предыдущими смесями. Следует отметить достаточно быструю смену числа волн при НСД этой смеси — от долей миллисекунды до нескольких миллисекунд.

В камерах A30, A3 и A40, имеющих широкую щель для подачи воздуха, так и не удалось достичь двухволновых режимов. Лишь в камере A3 при $g_\delta = 488 \div 646 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ наблюдали конкуренцию между одной и двумя ПДВ. Очевидно, что для повышения устойчивости волн

и увеличения их числа необходимо улучшение перемешивания компонентов смеси.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

При заданных параметрах форсунки горючего и длине кольцевой цилиндрической камеры больше критической, $L_c > h$, где h — высота фронта BC (см. рис. 2, в), режимы НСД в каждом из трех исследованных составов ТВС (CO/H_2 — воздух) зависят от трех определяющих параметров: удельного расхода воздуха через щель основной системы подачи g_δ , коэффициента расширения камеры сгорания K_S и коэффициента избытка горючего ϕ_1 .

3.1. Влияние соотношения компонентов смеси

Рассмотрим при фиксированных значениях K_S поведение НСД в зависимости от состава ТВС. На рис. 8 представлены зависимости частоты ПДВ f от параметра g_δ для трех составов ТВС синтез-газ — воздух при $K_S = 5.255$. Они позволяют однозначно описать следующие закономерности зарождения и протекания НСД в смесях CO/H_2 — воздух при варьировании удельного расхода воздуха g_δ . Существует минимальное значение $g_{\delta, \min} \approx 100 \div 200 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, при котором формируется одноволновый режим НСД. С увеличением удельного расхода воздуха на входе в камеру

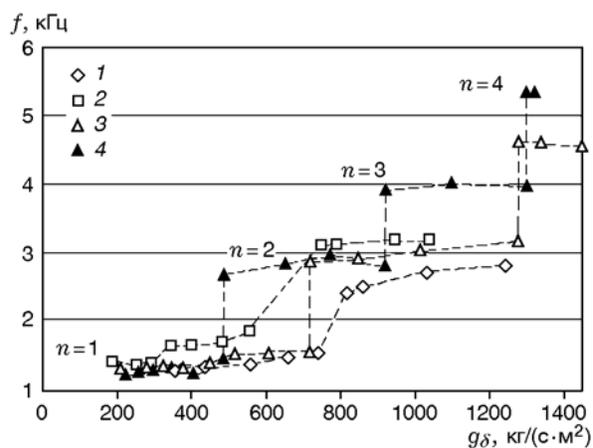


Рис. 8. Частота ПДВ в зависимости от удельного расхода воздуха через кольцевую щель для различных составов смеси CO/H_2 — воздух ($K_S = 5.255$):

1 — $\text{CO} + \text{H}_2$, 2 — $\text{CO} + 2\text{H}_2$, 3 — $\text{CO} + 3\text{H}_2$, 4 — $\text{CO} + 3\text{H}_2$; $\alpha > 0$

сгорания режим НСД эволюционирует по следующей схеме: $(n = 1) \rightarrow (n = 2) \rightarrow (n = 3) \rightarrow$ и т. д. Хорошо видно, что с ростом параметра g_δ частота вращения ПДВ, как правило, монотонно увеличивается. Отметим, что для горючего CO/H_2 картина перехода на двухволновый режим НСД зависит от состава синтез-газа. Так, для состава $\text{CO} + \text{H}_2$ в диапазоне $738 < g_\delta < 817 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и для состава $\text{CO} + 2\text{H}_2$ в диапазоне $560 < g_\delta < 755 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ наблюдали в течение десятков миллисекунд «конкуренцию» между одноволновым и двухволновым режимами НСД. В то же время для состава $\text{CO} + 3\text{H}_2$ переход от одноволнового ($n = 1$) к двухволновому ($n = 2$) детонационному режиму происходил быстро на нескольких оборотах ПДВ ($\Delta t \approx 2 \text{ мс}$) при $g_\delta = 720 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, что на рис. 8 (кривая 3) отражено скачком частоты ПДВ от 1.57 до 2.9 кГц. Выявлена следующая закономерность: с ростом параметра g_δ число ПДВ увеличивается сначала для состава синтез-газа, содержащего большую долю водорода.

3.2. Влияние добавочной подачи воздуха ($G_{a2} > 0$)

Добавка воздуха в продукты детонации приводит к повышению давления в камерах сгорания и снижению высоты поперечного фронта. В результате возрастает количество ПДВ, но уменьшается их скорость, так как фронты движутся по менее перемешанной смеси (качество смесеобразования ухудшается при приближении к переднему торцу камеры). Снижению скорости ПДВ способствует и интенсификация обычного горения, которое всегда сопутствует детонационному и усиливается с повышением давления. При этом продуктами обычного горения разбавляется и исходная смесь. Подобные явления наблюдались и ранее при использовании в качестве горючего чистого водорода [4, 8, 9].

Поскольку при $G_{a2} > 0$ число ПДВ возрастает, то при увеличении удельных расходов воздуха g_δ переходы к большему числу волн начинаются при их меньших значениях (см. рис. 8, зависимости 3 и 4). Значения α , при которых возможны эти переходы, необходимо рассматривать для каждого конкретного случая (здесь в камере А2 переход $n = 1 \rightarrow 2$ происходил при $\alpha \approx 0.15$). Очевидно, при $\alpha > 0.15$ этот переход будет осуществляться при меньшем значении g_δ .

3.3. Относительное полное давление продуктов на выходе

В экспериментах наряду с полным давлением воздуха в коллекторе основной подачи $p_{m,a1}$ измерялось полное давление продуктов детонации на выходе из камеры p_{ex0} , которое является важной интегральной характеристикой процесса. Обобщающие зависимости отношения этих величин $p_{ex0}/p_{m,a1}$ от удельного расхода воздуха g_δ для смеси CO/H_2 — воздух приведены на рис. 9 (результаты тех же опытов по реализации НСД, что и на рис. 8). Для сравнения приведены также данные для ТВС H_2 — воздух [9].

На рис. 9 видно, что при $G_{a2} = 0$ и критическом истечении продуктов из камеры устанавливается примерно одинаковое отношение давлений: $p_{ex0}/p_{m,a1} = 0.27$ для водорода при $g_\delta > 1200 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, и $p_{ex0}/p_{m,a1} = 0.53 \pm 0.03$ для всех трех составов синтез-газа при $g_\delta > 500 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. Это свидетельствует, во-первых, о прямо пропорциональной зависимости величин p_{ex0} и $p_{m,a1}$, во-вторых, о значительных потерях полного давления на щели подачи воздуха, в детонационных и ударных скачках, процессах перемешивания и трения на стенках камеры сгорания. Видно, что потери тем больше, чем больше коэффициент расширения камеры сгорания K_S . Для водородовоздушных смесей (кривые 1, 2) $K_S = 10.7$,

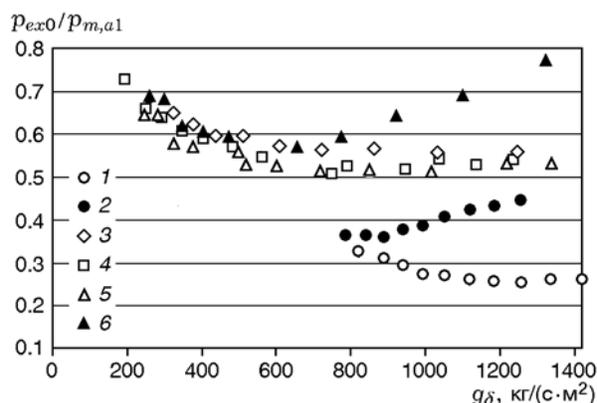


Рис. 9. Зависимость отношения $p_{ex0}/p_{m,a1}$ от удельного расхода воздуха при НСД различных смесей:

a — H_2 — воздух ($K_S = 10.7$ [9]): 1 — $G_{a2} = 0$, 2 — $G_{a2} > 0$, $\alpha = 1.1 \rightarrow 0.92$ [9]; b — CO/H_2 — воздух ($K_S = 5.255$): $G_{a2} = 0$: 3 — $\text{CO} + \text{H}_2$, 4 — $\text{CO} + 2\text{H}_2$, 5 — $\text{CO} + 3\text{H}_2$; 6 — $G_{a2} > 0$, $\alpha = 1.02 \rightarrow 0$, $\text{CO} + 3\text{H}_2$

а в опытах с синтез-газом (кривые 3–6) $K_S = 5.255$. Оценки показывают, что для водородо-воздушных смесей при $K_S = 5.255$ (как и в опытах с синтез-газом) $p_{ex0}/p_{m,a1} \approx 0.5$. То есть при одинаковых значениях K_S потери практически не зависят от состава исследованных ТВС. При входе скачка уплотнения в камеру сгорания давление торможения уменьшается медленнее, чем давление в коллекторе воздуха, поэтому отношение $p_{ex0}/p_{m,a1}$ возрастает. Принципиально важно, что при $G_{a2} > 0$ отношение $p_{ex0}/p_{m,a1}$ также растет. Так, для смеси H_2 — воздух при $\alpha = 1.09$ (кривая 2) это отношение увеличилось в 1.7 раза, достигнув значения $p_{ex0}/p_{m,a1} \approx 0.434$, а для смеси $CO + 3H_2$ — воздух при $\alpha = 1.02$ (кривая 6) — в 1.5 раза, достигнув значения $p_{ex0}/p_{m,a1} \approx 0.78$. И это не предел. В некоторых экспериментах с этой же смесью при $\alpha = 2.5$ была реализована НСД при $p_{ex0}/p_{m,a1} \approx 1$. Увеличение параметра α удалось достичь уменьшением расхода воздуха в основной и увеличением в добавочной подаче. В этом случае $p_{m,a1} \approx p_{ex0} = 3.2 \cdot 10^5$ Па, статическое давление в камере $p_{c1} = 2.73 \cdot 10^5$ Па, наблюдали четыре устойчивые ПДВ, движущиеся со скоростью $D = 1.265$ км/с. Следует отметить, что эти результаты получены в короткой камере длиной $L_c = 155$ мм.

3.4. Удельные импульсы

Подвод дополнительной массы газа в поток равносителен сужению проходного сечения трубок тока, а устройство, производящее такое воздействие, называется «полумассовым» соплом [10]. Определим влияние добавки воздуха в продукты НСД на удельный импульс камеры сгорания. Сила тяги определяется формулой [11]

$$F = \int_S [p + \rho v^2 - p_a] dS = (p_{ex0} - p_a) S_c, \quad (3)$$

где ρ — плотность, v — скорость, p_a — противодавление, dS — площадь элементарной трубки тока. Измеряя давление торможения продуктов p_{ex0} на выходе из камеры при их истечении в атмосферу, можно определить силу тяги F и удельный импульс относительно расхода горючего: $I_{sp,f} = (p_{ex0} - p_a) S_c / (G_f g)$. Здесь $g = 9.81$ м/с² — ускорение свободного падения.

На рис. 10 для смесей $CO + 3H_2$ — воздух и H_2 — воздух представлены зависимости

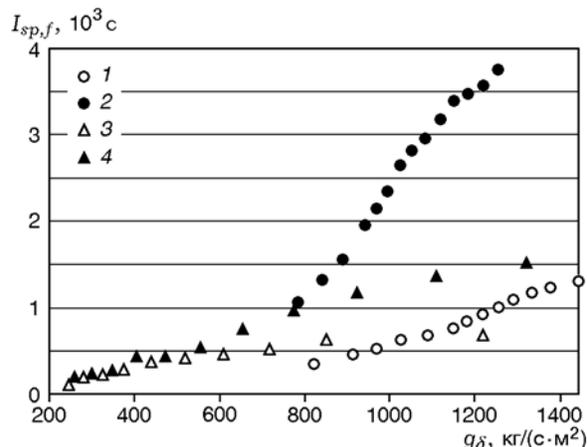


Рис. 10. Зависимость удельных импульсов от удельного расхода воздуха при НСД различных смесей:

a — H_2 — воздух: 1 — $G_{a2} = 0$, 2 — $G_{a2} > 0$, $\alpha = 1.1 \rightarrow 0.92$; b — $CO + 3H_2$ — воздух: 3 — $G_{a2} = 0$, 4 — $G_{a2} > 0$, $\alpha = 1.02 \rightarrow 0$

удельных импульсов относительно расхода горючего $I_{sp,f}$ при НСД от удельного расхода воздуха через щель g_δ при истечении продуктов детонации в атмосферу. Результаты взяты из тех же опытов по реализации НСД, что и на рис. 8, 9.

Видно, что с увеличением параметра g_δ удельные импульсы $I_{sp,f}$ для исследованных ТВС монотонно растут. При $G_{a2} = 0$ (кривые 1, 3) и наибольших значениях g_δ величины удельных импульсов для смеси H_2 — воздух почти вдвое больше, чем для $CO + 3H_2$. Заметим, что согласно экспериментальным данным для составов $CO + 2H_2$ и $CO + H_2$ это различие еще больше. Установлено, что при $G_{a2} > 0$ удельные импульсы увеличиваются для всех смесей. Так, при наибольших значениях g_δ ($\alpha = 1.1$) для смеси H_2 — воздух (кривая 2) $I_{sp,f} \approx 3770$ с, что почти в четыре раза больше, чем при $\alpha = 0$ (кривая 1). При наибольших значениях g_δ ($\alpha = 1.02$) для смеси $CO + 3H_2$ — воздух (кривая 4) $I_{sp,f} = 1530$ с, что почти в два раза больше, чем при $\alpha = 0$ (кривая 3). С уменьшением параметра α , а также при докритическом истечении продуктов из камеры значения $I_{sp,f}$ уменьшаются и для всех смесей при $g_\delta \rightarrow 0$ приближаются к нулю.

Относительно удельных импульсов $I_{sp,f}$ для смесей синтез-газа следует сделать одно замечание. В реальных системах синтез-газ генерируется в специальном устройстве перед ка-

мерой сгорания в результате предварительной конверсии исходного углеводородного топлива. Поэтому, строго говоря, необходимо рассчитывать удельный импульс не на расход синтез-газа, а на расход исходного углеводородного топлива. Последнее означает, что величину удельных импульсов для смеси $\text{CO} + 3\text{H}_2$ — воздух (см. кривые 3, 4 на рис. 10) нужно увеличить в 1.889 раза, чтобы получить значение удельного импульса $I_{sp,f0}$ относительно расхода исходного углеводородного топлива. Для состава $\text{CO} + 2\text{H}_2$ — воздух коэффициент увеличения равен 2, а для смеси $\text{CO} + \text{H}_2$ — воздух он составил 2.143.

Таким образом, при реализации НСД в ТВС добавочная подача воздуха во вторую половину кольцевой камеры сгорания, по крайней мере до значений $\alpha \approx 2.5$, при которых в экспериментах реализована НСД, является эффективным средством увеличения полного давления в камере и удельного импульса, уменьшения температуры продуктов и коэффициента избытка горючего на выходе из камеры.

3.5. Область реализованных режимов НСД

Представляет интерес обобщение экспериментальных данных по реализации НСД с целью построения области ее существования в обобщающих координатах. В проточной кольцевой камере сгорания фиксированного диаметра $d_c = 306$ мм и длиной $L_c = 500 \div 885$ мм в широких пределах варьировались ширина кольцевой щели подачи воздуха δ , ширина канала камеры Δ и удельный расход воздуха через щель g_δ .

Область реализации НСД является функцией трех независимых параметров K_S , ϕ_1 и g_δ . Данные области реализации НСД в проточной кольцевой камере сгорания диаметром $d_c = 306$ мм в координатах (ϕ_1, g_δ) при двух значениях параметра K_S для трех составов смеси CO/H_2 — воздух представлены на рис. 11.

Ниже и левее штриховой кривой детонационные режимы не наблюдались (обычное горение). Верхние пределы по удельному расходу g_δ оказались недостижимыми для имеющейся экспериментальной установки. Однако можно утверждать, что все режимы НСД, очерченные снизу штриховой кривой и границами рамок (правый верхний угол), осуществимы. При $g_\delta > 600$ кг/(с·м²) проявляется нижний предел по коэффициенту избытка горючего —

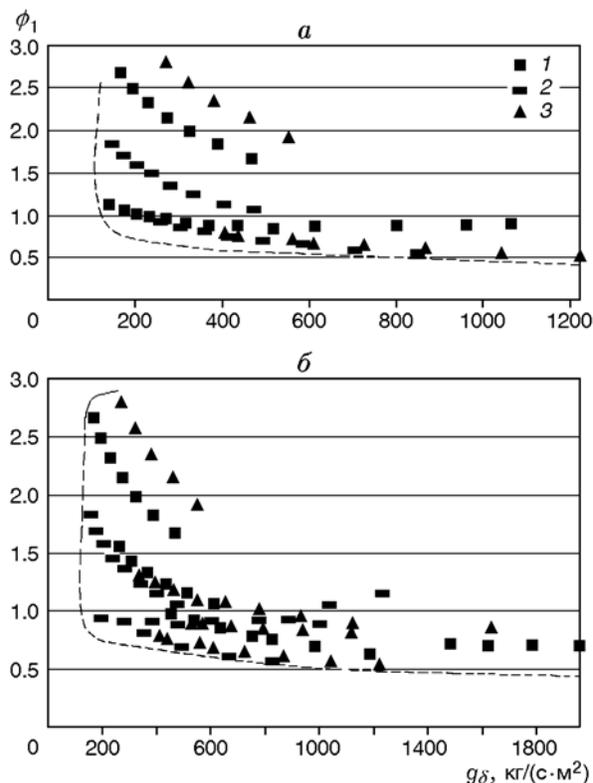


Рис. 11. Область реализации НСД в координатах (g_δ, ϕ_1) :

a — $K_S = 7.16$; b — $K_S = 5.255$; 1 — $\text{CO} + \text{H}_2$, 2 — $\text{CO} + 2\text{H}_2$, 3 — $\text{CO} + 3\text{H}_2$

$\phi_1 \approx 0.5$. Он слабо уменьшается с ростом параметра g_δ . Видно, что с уменьшением параметра K_S левая граница области реализации НСД расширяется по удельному расходу подачи воздуха через кольцевую щель. С дальнейшим уменьшением параметра K_S граница по g_δ сдвигается еще левее, например, при $K_S = 2.654$ для синтез-газа состава $\text{CO} + 3\text{H}_2$ — до $g_\delta \approx 100$ кг/(с·м²).

Итак, систематическими экспериментами определена область реализации НСД смесей составов $\text{CO} + \text{H}_2$ — воздух, $\text{CO} + 2\text{H}_2$ — воздух, $\text{CO} + 3\text{H}_2$ — воздух в зависимости от определяющих параметров: удельного расхода воздуха через кольцевую щель g_δ , коэффициента расширения камеры сгорания K_S и коэффициента избытка горючего ϕ_1 .

ВЫВОДЫ

1. В проточной кольцевой цилиндрической камере сгорания диаметром 306 мм при варьировании геометрии камеры реализованы ре-

жимы непрерывного детонационного сжигания смесей синтез-газ — воздух трех составов в поперечных (спиновых) детонационных волнах.

2. Определены пределы существования непрерывной детонации по удельному расходу воздуха через щель основной системы подачи (минимальные значения) и по коэффициенту избытка горючего (минимальные и максимальные значения). Для ряда значений степени расширения камеры сгорания построена область реализации детонационных режимов в координатах этих переменных.

3. Процесс НСД в смесях синтез-газ — воздух за счет подачи дополнительного воздуха во вторую половину камеры сгорания допускает увеличение частоты вращения ПДВ до 7 кГц и снижение концентрации горючего по сравнению со стехиометрией, при этом одновременно обеспечивается повышение удельного импульса и снижение температуры продуктов на выходе из камеры сгорания.

4. Максимальная скорость поперечных детонационных волн наблюдалась при наибольшем содержании водорода в составе синтез-газа.

5. Структура ПДВ и высота фронтов в исследованных смесях близки к определенным ранее для водородовоздушных смесей.

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., 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. **Козюков Е. А., Крылова А. Ю., Крылова М. В.** Химическая переработка природного газа. — М.: Изд-во МАИ, 2006.
6. **Батенин В. М., Зайченко В. М., Косов В. Ф., Синельщиков В. А.** Пиролитическая конверсия биомассы в газообразное топливо // Докл. АН. — 2012. — Т. 446, № 2. — С. 179–182.
7. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация смесей синтез-газ — воздух // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 4. — С. 60–67.
8. **Vukovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F.** Continuous spin detonations // J. Propul. Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1204–1216.
9. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация водородовоздушной смеси с добавкой воздуха в продукты и в зону смесеобразования // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 60–68.
10. **Феодосьев В. И.** Основы техники ракетного полета. — М.: Наука, 1979.
11. **Абрамович Г. М.** Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1976.

*Поступила в редакцию 11/IX 2014 г.,
в окончательном варианте — 14/XI 2014 г.*