

УДК 534.222.2,544.454.3

ПАРАМЕТРЫ НЕПРЕРЫВНОЙ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕЙ МЕТАН/ВОДОРОД — ВОЗДУХ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ ВОЗДУХА В ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ

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

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

Приведены результаты экспериментальных исследований в проточной кольцевой цилиндрической камере наружного диаметра 503 мм. Изучалось влияние добавки воздуха в продукты непрерывной спиновой детонации смесей CH_4/mH_2 — воздух на параметры детонационных волн, на давление в камере и удельный импульс. Показано, что добавка воздуха в продукты детонации увеличивает скорость непрерывной спиновой детонации, давление в камере и тягу, уменьшает удельный расход горючего.

Ключевые слова: добавочная подача воздуха, непрерывная спиновая детонация, непрерывная многофронтная детонация, метан, водород, воздух, поперечные детонационные волны, кольцевая камера сгорания, структура течения, удельный импульс.

DOI 10.15372/FGV20200211

ВВЕДЕНИЕ

Добавочная подача воздуха в продукты горения давно практикуется в прямоточных воздушно-реактивных (ПВРД) [1] и газотурбинных (ГТД) двигателях [2]. Это связано с охлаждением стенок камер сгорания (ГТД и ПВРД) и продуктов горения до приемлемой температуры перед подачей их на турбину (ГТД). Кроме того, как следует из второго закона Ньютона, добавочная подача воздуха в продукты сгорания способствует повышению полного импульса двигателя, так как его величина пропорциональна произведению массы и скорости отбрасываемого рабочего тела. Возможность реализации в проточных кольцевых камерах сгорания режимов непрерывной спиновой детонации (НСД) ряда топливовоздушных смесей [3–6] поставила вопрос о влиянии добавочной подачи воздуха на область реализации НСД в кольцевых камерах сгорания. Ранее в камере кольцевой цилиндрической геометрии диаметром 306 мм режимы НСД были получены при добавочной подаче воздуха в продукты детонационного сжигания смеси H_2 — воздух [7], а в камере диаметром 503 мм (ДК-500) — в смеси $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ — воздух [8]. Способ и устрой-

ство детонационного сжигания топливных смесей при добавочной подаче воздуха в камеру сгорания защищены патентом [9]. Цель настоящей работы — в камере ДК-500 исследовать влияние добавочной подачи воздуха в продукты детонационного горения бинарного горючего метан/водород и отдельных его составляющих (метана и водорода) на параметры детонационного процесса, в частности на удельный импульс тяги, с учетом энергии сжатия газов в ресиверах компонентов смеси.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Кольцевая детонационная камера 1 представляла собой коаксиальный канал с внешним диаметром $d_c = 503$ мм, длиной $L_c = 680$ мм и зазором $\Delta = 18$ мм (рис. 1). Площадь проходного сечения канала камеры $S_\Delta = \pi(d_c - \Delta)\Delta = 274.2$ см². Система подачи компонентов горючей смеси в камеру состояла из следующих элементов. Тракт подачи первичного воздуха: два ресивера 2, клапаны 3, кольцевой коллектор 4 и кольцевая щель 5 шириной $\delta = 3.5$ мм (площадь проходного сечения $S_\delta = \pi(d_c - \delta)\delta = 54.9$ см²), степень расширения канала камеры ДК на входе $K_S = S_\Delta/S_\delta = 5.0$. Тракт подачи вторичного воздуха: ресивер 6, клапан 7, кольцевой коллектор 8 и форсунка 9, имеющая 600 отверстий диаметром 3.5 мм, равномерно распределенных по внутренней стенке камеры (площадь проходного сечения отверстий $S_{\delta 1} =$

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

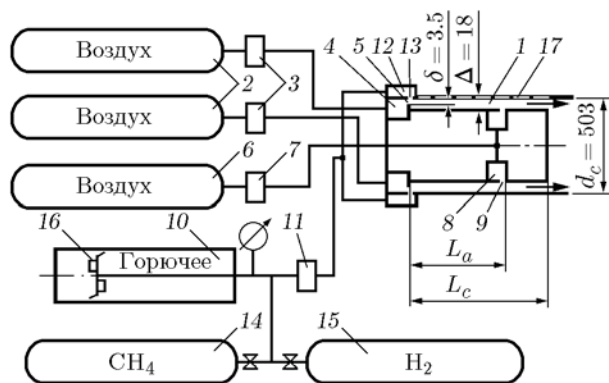


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

57.7 см²) и расположенных на расстоянии $L_a = 490$ мм от переднего торца ДК. Тракт подачи бинарного горючего CH_4/mH_2 : ресивер 10, клапан 11, кольцевой коллектор 12, кольцевая форсунка 13 (600 отверстий с поперечным сечением 0.35×1.45 мм, направленных попарно под углом 90° и 45° к оси камеры, площадь поперечного сечения отверстий $S_f = 3.05$ см²). Бинарное горючее составляли непосредственно в ресивере 10, подавая CH_4 и H_2 из баллонов 14 и 15, перемешивая компоненты с помощью крыльчатки 16, установленной на сегнеровом колесе. Первичный воздух и смесь горючих газов подавались у переднего торца ДК вблизи наружной стенки.

Начальное давление составляло: в двух ресиверах воздуха 2 — $p_{r,a10} = p_{r,a20} = (10 \div 30) \cdot 10^5$ Па, в ресивере добавочного воздуха 6 — $p_{r,a30} = 90 \cdot 10^5$ Па, в ресивере горючего 10 — $p_{r,f0} = (15 \div 75) \cdot 10^5$ Па. Начальные расходы компонентов смеси изменялись в диапазонах: первичный воздух — $G_{a10} + G_{a20} = 4.9 \div 15.4$ кг/с (удельный расход через кольцевую щель $5 g_\delta = (G_{a10} + G_{a20})/S_\delta = 900 \div 3220$ кг/(с·м²)), вторичный воздух — $G_{a30} \approx 28$ кг/с, бинарное горючее CH_4/mH_2 — $G_{f0} = 0.115 \div 0.684$ кг/с, метан — $G_{f0} = 0.342 \div 0.508$ кг/с, водород — $G_{f0} = 0.168 \div 0.362$ кг/с. За время эксперимента (около 0.8 с) текущие расходы первичного воздуха $G_{a1} + G_{a2}$ и бинарного горючего G_f уменьшались до 10 раз, метана — в 8.5 раза, водорода — до 20 раз, а добавочного воздуха G_{a3} — в 15 раз. Коэффициент избытка горючего ϕ_1 на входе в ДК составлял $\phi_1 = 0.4 \div 1.45$. В опытах варьировалось отношение добавочного расхода воздуха к основному $\alpha = G_{a3}/(G_{a1} + G_{a2}) =$

$0.64 \div 4.63$, а общий коэффициент избытка горючего составлял $\phi_\Sigma = \phi_1/(1 + \alpha) = 0.12 \div 0.4$. Истечение продуктов детонации 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 17, расположенные друг за другом вдоль стенки камеры (см. рис. 1). Ширина каждого окна: 20 мм, длина 93 мм; расстояние между окнами 24 мм. Размеры окон служили масштабом элементов структуры течения в камере сгорания. Метод определения частоты f , числа поперечных детонационных волн (ПДВ) n и скорости НСД D аналогичен [4]. Датчиками давления фирмы «Графэг» (Швейцария) класса точности 0.5 % измерялось давление: в ресиверах бинарного горючего ($p_{r,f}$), основной ($p_{r,a1}$, $p_{r,a2}$) и дополнительной подачи воздуха ($p_{r,a3}$), в коллекторах горючего ($p_{m,f}$), основной ($p_{m,a}$) и дополнительной ($p_{m,a3}$) подачи воздуха. Также измерялись статическое (p_{c1} , p_{c3}) и полное (p_{c30}) давление в камере сгорания: статическое p_{c1} — на расстоянии 15 мм от входа в ДК, а статическое p_{c3} и полное p_{c30} — вблизи выхода из ДК.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В камере ДК-500 при $K_S = 5.0$ в области указанных выше параметров подачи компонентов топливовоздушной смеси на входе в камеру сгорания (G_{a1} , G_{a2} , G_f) и добавочной подачи воздуха G_{a3} в продукты сгорания были исследованы возможности реализации непрерывной детонации с ПДВ бинарного горючего CH_4/mH_2 с содержанием водорода $m = 8, 4, 2$ и 1, а также в монотопливах метан и водород.

2.1. Горючее $\text{CH}_4/8\text{H}_2$

В диапазоне удельных расходов первичного воздуха через кольцевую щель $g_\delta = 112 \div 2800$ кг/(с·м²) при $\phi_1 = 0.6 \div 1.16$ с добавкой вторичного воздуха в продукты сгорания $\alpha = 0.64 \div 4.63$ осуществлены двухволновые режимы НСД и непрерывной многофронтной детонации (НМД) со встречными ПДВ, параметры которых представлены в табл. 1 по мере возрастания начального значения α .

На рис. 2,а приведены фрагменты фоторегиограмм при наибольшей подаче добавочного воздуха в данных экспериментах, слева —

Таблица 1

Параметры НСД и НМД в смеси воздуха с горючим $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ при добавочной подаче воздуха в продукты детонации ($\alpha > 0$)

Номер опыта	g_δ , кг/(с·м ²)	ϕ_1	α	f , кГц	n	D , км/с	Режим
1	2800 → 729	1.16 → 0.8	1.26 → 0.78	2.11 → 1.47	2	1.67 → 1.16	НСД
	729 → 383	0.8 → 0.68	0.78 → 0.64	≈1.3	2		НМД
2	2091 → 328	0.72 → 0.68	1.5 → 1.12	1.91 → 1.29	2	1.51 → 1.29	НСД
	328 → 221	0.68 → 0.67	1.12 → 1.07	≈1.3	2		НМД
3	1505 → 474	0.65	2.71 → 1.99	1.74 → 1.4	2	1.38 → 1.08	НСД
	474 → 230	0.65	1.99 → 1.68	≈1.3	2		НМД
4	900 → 178	1.08 → 0.85	4.63 → 2.21	2.0 → 1.61	2	1.58 → 1.27	НСД
	178 → 128	0.85 → 0.81	2.21 → 1.96	≈1.3	2		НМД

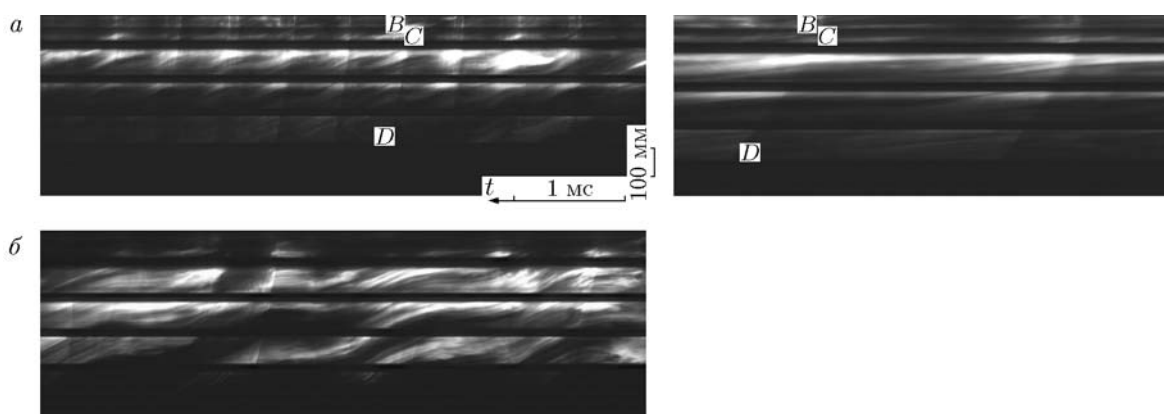


Рис. 2. Фрагменты фоторегистрограмм НСД и НМД в смеси $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ — воздух с добавочной подачей воздуха в продукты детонации:

a — НСД: $g_\delta = 823$ кг/(с·м²), $\phi_1 = 1.07$, $\alpha = 4.4$, $n = 2$, $f = 2.0$ кГц, $D = 1.58$ км/с; *б* — НМД: $g_\delta = 166$ кг/(с·м²), $\phi_1 = 0.84$, $\alpha = 2.16$, $f \approx 1.3$ кГц

фрагмент длительностью 5 мс, включающий в себя 11 ПДВ, справа — 2 ПДВ, вращающиеся в камере и согласующиеся с ее размерами (см. также табл. 1, опыт 4). ПДВ с фронтом BC , от которого отходит ударная волна (шлейф) CD , движутся слева направо. Величина фронта BC оценивается значением $h \approx 10$ см, а его отношение к расстоянию между ПДВ — $h/l \approx 1/8$, где $l = 79$ см. В этом опыте режимы НСД с двумя ПДВ ($n = 2$) и частотой вращения $f = 2.0 \rightarrow 1.61$ кГц ($D = 1.58 \rightarrow 1.27$ км/с) наблюдали при $g_\delta = 900 \rightarrow 178$ кг/(с·м²), $\phi_1 = 1.08 \rightarrow 0.85$, $\alpha = 4.63 \rightarrow 2.21$. При меньших значениях $g_\delta < 178$ кг/(с·м²), $\phi_1 \leq 0.85$, $\alpha < 2.21$ были реализованы режимы НМД с двумя нерегулярными встречными волнами с частотой $f \approx 1.3$ кГц (рис. 2,б). По фоторегистрограмме невозможно оценить размеры фронтов сталкивающихся ПДВ, так как они нестационарны во времени и пространстве. Направление вращения ПДВ

определяли при просмотре последовательности отдельных полных кадров, снятых высокоскоростной камерой (замедленное кино).

Для рассмотренного выше эксперимента на рис. 3,а представлены осциллограммы изменения во времени давления в ресиверах и коллекторах, а на рис. 3,б — в начале ДК-500 и на выходе из нее, а также для сравнения в коллекторе воздуха основной подачи. Процесс инициировался струей продуктов горения ацетилена и кислорода, факел которой поджигал топливовоздушную смесь после подачи горючего в камеру ДК-500. При этом истечение смеси продуктов и добавочного воздуха из камеры сгорания было околокритическим, а истечение воздуха из коллектора основной подачи — докритическим, реагирующим на изменение условий в ДК (см. рис. 3,б, соотношения p_{c30}/p_{c3} и $p_{m,a}/p_{c1}$ соответственно). Поэтому расход воздуха в основной подаче зависел от давления в

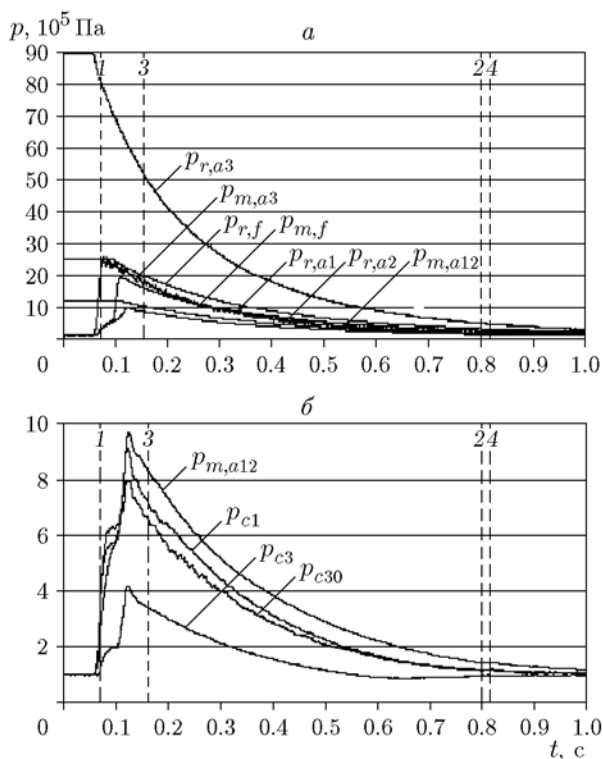


Рис. 3. Осциллограммы давления в системе подачи компонентов смеси (а) и в камере ДК-500 (б):

1 — инициирование, 2 — переход НСД в НМД, 3 и 4 — параметры НСД и НМД, соответствующие рис. 2 ($G_f = 0.205 \rightarrow 0.022$ кг/с, $G_{a1} + G_{a2} = 4.93 \rightarrow 0.705$ кг/с, $G_{a3} = 22.83 \rightarrow 1.38$ кг/с, $\phi_1 = 1.08 \rightarrow 0.805$, $\alpha = 4.63 \rightarrow 1.96$)

камере сгорания. В начале эксперимента полное давление составляло $p_{c30} \approx 7.9 \cdot 10^5$ Па, а к концу эксперимента снижалось до $p_{c30} \approx 1.1 \cdot 10^5$ Па, т. е. истечение продуктов из камеры становилось докритическим.

2.2. Горючее $\text{CH}_4/4\text{H}_2$

В диапазоне удельных расходов первичного воздуха через кольцевую щель $g_\delta =$

$156 \div 1490$ кг/(с·м²) при $\alpha = 1.45 \div 2.67$ наблюдали режимы НСД и НМД. Параметры процесса в исследованном диапазоне расходов смеси $\text{CH}_4/4\text{H}_2$ — воздух с добавочной подачей воздуха в продукты детонации представлены в табл. 2.

Структура детонационных волн в режиме НСД отличается значительной нерегулярностью по сравнению с представленными на рис. 2,а для горючей смеси $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ — воздух, а скорость — меньшими значениями. В режиме НМД нерегулярность поперечных волн является их признаком, поэтому структура ПДВ не отличается от приведенной на рис. 2,б. Профили давления в системе подачи и в камере сгорания близки к наблюдаемым для горючего $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ (см. рис. 3).

Заметим, что в ДК-500 для смеси $\text{CH}_4/4\text{H}_2$ — воздух без вторичной подачи воздуха ($\alpha = 0$) [6] в диапазонах $g_\delta = 3100 \rightarrow 470$ кг/(с·м²) и $\phi_1 = 0.95 \rightarrow 0.97$ реализован только одноволновый режим НСД с частотой вращения $f = 0.83 \rightarrow 0.56$ кГц.

2.3. Горючее $\text{CH}_4/2\text{H}_2$

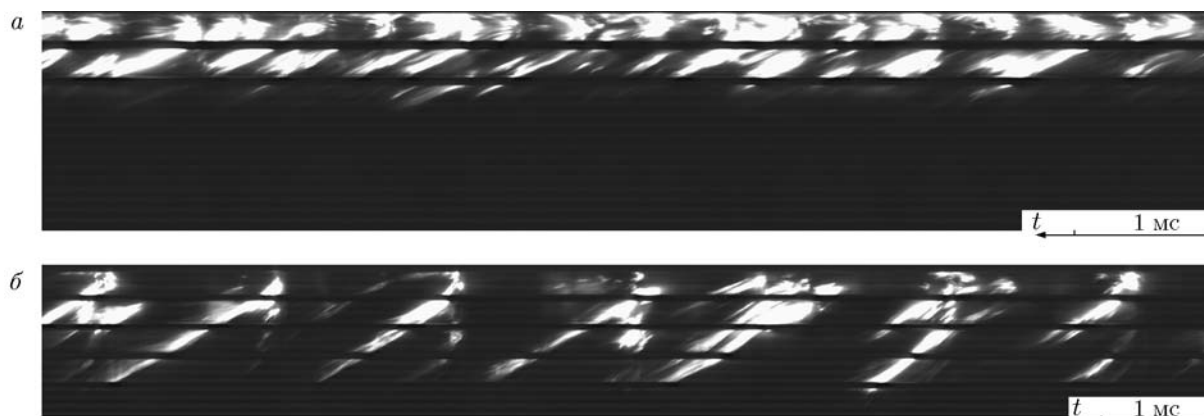
В одном опыте двухволновый режим НСД зарождался только при $\phi_1 > 0.64$ и существовал в диапазоне $\phi_1 = 0.64 \rightarrow 0.78$ при $g_\delta = 678 \rightarrow 273$ кг/(с·м²), $\alpha = 2.04 \rightarrow 1.88$. Наблюдались нерегулярные и размытые по пространству волны и очаги горения (рис. 4,а).

В другом опыте стехиометрическое соотношение компонентов ($\phi_1 \approx 1.0$) выдерживалось постоянным в течение всего процесса. В результате наблюдали двухволновый режим НСД с изменением g_δ в диапазоне $1324 \rightarrow 565$ кг/(с·м²), $\alpha = 2.91 \rightarrow 2.05$ и с частотой ПДВ $f = 1.3 \rightarrow 1.02$ кГц, а затем одноволновый режим при $g_\delta = 565 \rightarrow 213$ кг/(с·м²), $\alpha = 2.05 \rightarrow 1.48$ с достаточно регулярными ПДВ (рис. 4,б) и частотой $f = 0.7 \rightarrow 0.43$ кГц. Ши-

Таблица 2

Параметры НСД и НМД в смеси воздуха с горючим $\text{CH}_4/4\text{H}_2$ при добавочной подаче воздуха в продукты детонации ($\alpha > 0$)

Номер опыта	g_δ , кг/(с·м ²)	ϕ_1	α	f , кГц	n	D , км/с	Режим
1	1490 \rightarrow 230	0.63 \rightarrow 0.74	2.67 \rightarrow 1.67	1.35 \rightarrow 1.2	2	1.08 \rightarrow 0.95	НСД
	230 \rightarrow 156	0.74 \rightarrow 0.76	1.67 \rightarrow 1.55	\approx 1.3	2		НМД
2	1380 \rightarrow 350	1.04 \rightarrow 1.08	2.67 \rightarrow 1.75	1.46 \rightarrow 1.08	2	1.15 \rightarrow 0.85	НСД
	350 \rightarrow 165	\approx 1.08	1.75 \rightarrow 1.45	\approx 1.3	2		НМД

Рис. 4. Фоторегистрограммы НСД в смеси $\text{CH}_4/2\text{H}_2$ — воздух:

а — $g_\delta = 480 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi_1 = 0.69$, $\alpha = 1.98$, $n = 2$, $f = 1.05 \text{ кГц}$, $D = 0.823 \text{ км}/\text{с}$; *б* — $g_\delta = 443 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi_1 = 1.02$, $\alpha = 1.89$, $n = 1$, $f = 0.64 \text{ кГц}$, $D = 1.01 \text{ км}/\text{с}$

Таблица 3

Параметры НСД и горения в смеси воздуха с горючим CH_4/H_2 при добавочной подаче воздуха в продукты сгорания ($\alpha > 0$)

Номер опыта	g_δ , $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	ϕ_1	α	f , кГц	n	D , $\text{км}/\text{с}$	Режим
1	1321 → 1200	1.17 → 1.14	2.77 → 2.67	1.15	2	0.91	НСД
	1200 → 745	1.14 → 0.98	2.67 → 2.29	0.7 → 0.54	1	1.11 → 0.85	НСД
	745 → 295	0.98 → 0.74	2.29 → 1.77	1.47 → 1.3	2	—	НМД
	295 → 235	0.74 → 0.69	1.77 → 1.67	—	—	—	Горение
2	1690 → 324	0.58 → 0.45	2.31 → 1.78	—	—	—	Очаговое горение
	324 → 155	0.45 → 0.4	1.78 → 1.63	—	—	—	Горение

рина фронта непрерывной детонации составляла $h \approx 25 \text{ см}$, а отношение $h/l \approx 1/6$. Отметим, что фрагменты процесса, приведенные на рис. 4, соответствуют близким значениям g_δ и α , поэтому протекание процесса целиком определялось коэффициентом избытка горючего.

При сжигании в ДК-500 смеси $\text{CH}_4/2\text{H}_2$ — воздух при $\alpha = 0$ [6] в диапазоне $g_\delta = 3916 \rightarrow 574 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и $\phi_1 = 1.0 \rightarrow 1.23$ реализован режим НМД с частотой вращения встречных ПДВ $f = 1.34 \rightarrow 0.86 \text{ кГц}$, а при $g_\delta < 574 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ — только режим горения. Последнее означает, что для бинарных горючих CH_4/H_2 добавочная подача воздуха в продукты сгорания сдвигает границу реализации режимов НСД в область меньших концентраций водорода в бинарном горючем.

2.4. Горючее CH_4/H_2

Опыты проводили при $g_\delta = 155 \div 1690 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и $\alpha = 1.63 \div 2.82$. В различных опытах были реализованы режимы

НСД, «очагового» горения и турбулентного сплошного горения (табл. 3). Режим НСД существовал только вблизи стехиометрии и при повышенных давлениях в камере $p_{c30} = 8.6 \rightarrow 4.3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (опыт 1). Структура ПДВ в режиме НСД размыта и нерегулярна, как отмеченная выше для горючего $\text{CH}_4/2\text{H}_2$ (см. рис. 4, *а*). Режим НМД, сменивший НСД, также имел характерную нерегулярную структуру с размытыми фронтами. Режим горения сопровождался нерегулярными поперечными и продольными волнами.

В бедной горючим смеси (опыт 2) обнаружилось не наблюдаемое ранее очаговое горение (рис. 5, *а*). Наконец, при малых значениях $\phi_1 \approx 0.45$ развивалось сплошное горение с фронтом у начала камеры (рис. 5, *б*).

2.5. Горючее CH_4

Проведены опыты со смесью вблизи стехиометрии обедненной горючим и при повышенном вдвое расходе смеси основной пода-

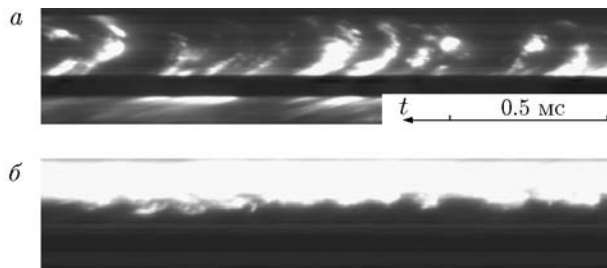


Рис. 5. Очаговое (а) и сплошное (б) горение смеси CH_4/H_2 — воздух (фрагменты):

а — $\phi_1 = 0.5$, $g_\delta = 617 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\alpha = 1.96$; б — $\phi_1 = 0.45$, $g_\delta = 300 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\alpha = 1.76$

чи. В первых двух опытах соответственно в диапазонах $\phi_1 = 0.9 \rightarrow 1.16$, $g_\delta = 1680 \rightarrow 430 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\alpha = 2.16 \rightarrow 1.88$ и $\phi_1 = 0.64 \rightarrow 0.76$, $g_\delta = 1600 \rightarrow 525 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\alpha = 2.27 \rightarrow 1.8$ наблюдали очаговое горение вблизи начала камеры, аналогично случаю со смесью CH_4/H_2 — воздух (см. рис. 5, а). В третьем опыте вначале развивалось сплошное горение, фронт которого отстоял от начала камеры на $13 \div 15 \text{ см}$, с нерегулярными редкими всплшками выше фронта ($\phi_1 \approx 1.0$, $g_\delta = 3200 \rightarrow 1000 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и $\alpha \approx 1.0$). Затем развивалось очаговое горение, близкое к первому опыту. Ранее [6] при $\alpha = 0$ не удалось зажечь метан внутри камеры сгорания. После инициирования пламя выбрасывалось за ее пределы и догорание метана проходило в свободном пространстве.

2.6. Горючее H_2

В области удельных расходов воздуха $g_\delta = 112 \div 1560 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и его добавки $\alpha = 2.3 \pm 0.3$ проведены опыты с близкими к стехиомет-

рии соотношениями расходов водорода и воздуха основной подачи, а также с избытком и недостатком водорода (табл. 4). Во всех опытах наблюдали НСД, пределы существования которой при добавочной подаче воздуха расширились по минимальному коэффициенту избытка горючего ($\phi_{1 \min} \approx 0.4$, $\phi_{\Sigma \min} = 0.12$) при близких значениях α и при $\alpha = 0$ в камере сгорания диаметром 306 мм [4, 7]. В самом начале опыта 4 наблюдали три низкоскоростные ПДВ. При уменьшении давления в камере ($p_{c30} < 8.35 \cdot 10^5 \text{ Па}$, опыт 4) они исчезли и наблюдалось обычное горение. По мере роста коэффициента избытка горючего появлялись нерегулярные ПДВ, которые в конце опыта ($\phi_1 = 0.5 \rightarrow 0.51$) стабилизировались с достаточно низкой скоростью $D = 0.87 \text{ км}/\text{с}$.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Влияние добавочной подачи воздуха на детонационный режим

Описанные выше опыты в камере ДК-500 для смесей $\text{CH}_4/m\text{H}_2$ — воздух показывают, что добавочная подача воздуха в продукты сгорания не только не препятствует реализации детонационного режима, но и повышает скорость непрерывной детонации. Зависимости частоты вращения ПДВ f от удельного расхода первичного воздуха g_δ для смесей $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ — воздух и $\text{CH}_4/4\text{H}_2$ — воздух с добавочной подачей воздуха $G_{a3} > 0$ (точки 2, 4) и без нее $G_{a3} = 0$ (точки 1, 3) [6] представлены на рис. 6.

Хорошо видно, что при одинаковых значениях g_δ частота вращения ПДВ, следовательно,

Таблица 4

Параметры НСД в смеси H_2 — воздух при добавочной подаче воздуха в продукты детонации ($\alpha > 0$)

Номер опыта	g_δ , $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	ϕ_1	α	f , кГц	n	D , $\text{км}/\text{с}$	Режим
1	1457 → 119	1.24 → 0.9	2.63 → 2.2	3.84 → 0.88	4 → 1	1.7 ÷ 1.23	НСД
2	1400 → 150	1.61 → 1.35	1.97 → 2.12	3.49 → 0.92	4 → 1	1.57 ÷ 1.33	НСД
3	1560 → 344	0.62 → 0.64	2.24 → 2.2	2.65 → 1.67	3 → 2	1.61 → 1.29	НСД
	344 → 160	0.64 → 0.65	2.2 → 2.18	—	2 ↔ 1	—	НСД
	160 → 122	0.65	2.17	0.82 → 0.78	1	1.3 → 1.24	НСД
4	1686 → 1500	0.39	2.34	2.03	3	1.07	НСД
	1500 → 787	0.39 → 0.43	2.34 → 2.3	—	—	—	Горение
	787 → 181	0.43 → 0.5	2.3 → 2.24	—	—	—	Горение с ПДВ
	181 → 151	0.5 → 0.51	2.24	1.11	2	0.87	НСД

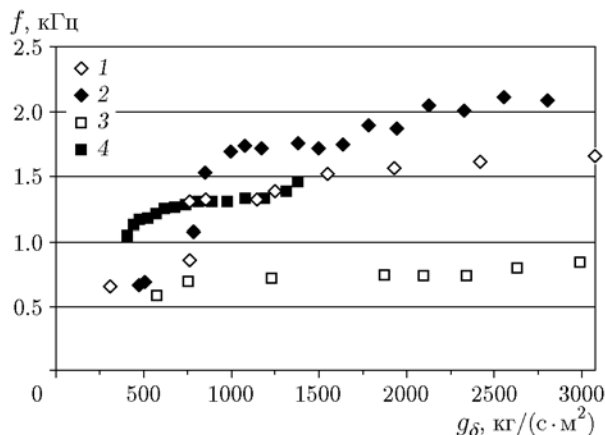


Рис. 6. Частота ПДВ в зависимости от удельного расхода первичного воздуха в камере ДК-500:

a — $\text{CH}_4/8\text{H}_2$: 2 — $\alpha = 1.16 \rightarrow 0.7$, 1 — $\alpha = 0$ [6];
b — $\text{CH}_4/4\text{H}_2$: 4 — $\alpha = 2.67 \rightarrow 1.75$, 3 — $\alpha = 0$ [6]

и скорость НСД при добавочной подаче воздуха больше, чем без нее. Для горючего $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ при $\alpha = 1.16 \rightarrow 0.7$ различие в частотах ПДВ достигает 30 %, а для $\text{CH}_4/4\text{H}_2$ при $\alpha = 2.67 \rightarrow 1.75$ наблюдали двухволновый режим НСД с частотой, вдвое большей, чем при $\alpha = 0$ (точки 3), когда существовал [6] только одноволновый режим НСД.

С возрастанием давления в камере сгорания при подаче добавочного воздуха уменьшается высота поперечного детонационного фронта ПДВ h . Если для горючего $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ при $\alpha = 0$ и $n = 2$ фронт составлял $h \approx 15$ см [6], то при $\alpha = 4.4$ — уже $h \approx 10$ см (см. рис. 2, *a*). Для горючего $\text{CH}_4/4\text{H}_2$ при $\alpha = 0$ существовал одноволновый режим НСД с $h \approx 50$ см [6], а при $\alpha = 2.67$ — двухволновый режим НСД с $h \approx 13$ см. Поскольку параметры истечения продуктов (скорость, давление, температура) выравниваются с удалением от детонационного фронта, то при той же длине камеры сгорания добавочная подача воздуха способствует этому процессу, что имеет значение применительно к ГТД.

Подача добавочного воздуха уменьшает нижний предел по содержанию водорода в бинарном горючем $\text{CH}_4/m\text{H}_2$ для реализации НСД. Если без добавки воздуха в продукты сгорания НСД наблюдали лишь в смеси $\text{CH}_4/4\text{H}_2$ — воздух, а при $m = 2$ и 1.5 — режим НМД [6], то с добавкой воздуха в диапазоне $\alpha = 2.82 \rightarrow 1.67$ при близких значениях ϕ_1 и g_δ были реализованы устойчивые режимы НСД с двумя

и одной ПДВ при $m = 2$ и 1 . Последнее означает уменьшение нижнего предела НСД по массовой доле водорода в бинарном горючем $\text{CH}_4/m\text{H}_2$ в 1.8 раза (с $1/5$ до $1/9$). Удалось даже возбудить очаговое горение смеси CH_4 — воздух внутри камеры, в то время как без добавки воздуха пламя выбрасывалось за ее пределы [6].

На примере смеси H_2 — воздух с добавкой воздуха показано, что уменьшается также и нижний предел по коэффициенту избытка горючего для реализации непрерывной детонации. Если при $\alpha = 0$ этот предел составлял $\phi_1 \approx 0.5$, то при $\alpha = 2.34$ режим НСД существовал при $\phi_1 \approx 0.4$. Эта же тенденция наблюдалась ранее в камере диаметром 306 мм [4, 7]. Если говорить о суммарном коэффициенте избытка горючего, то он составлял $\phi_\Sigma \approx 0.12$.

3.2. Влияние добавочной подачи воздуха на давление в камере сгорания и системе подачи

Подвод газа в канал камеры сгорания постоянного сечения формирует расходное сопло [10]. При этом трубки тока продуктов сужаются и на течение выше впрыска добавочного газа расходное сопло действует как геометрическое сопло, в частности, повышает давление в камере и снижает его перепад на щели подачи воздуха $p_{m,a}/p_{c1}$. Это отношение определяет гидравлические потери на щели подачи воздуха. Большой интерес представляет отношение $p_{m,a}/p_{c30}$, так как оно определяет одновременно гидравлические потери на щели и в камере. Зависимость $p_{m,a}/p_{c30}$ от величины α при постоянном удельном расходе воздуха $g_\delta = 1000$ кг/(с·м²) в режиме детонационного сжигания бинарного горючего $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ в различных опытах приведена на рис. 7.

Видно, что истечение воздуха через щель без его добавочной подачи критическое. Переход к докритическому истечению из щели осуществляется при $\alpha \approx 0.5$ с последующим заметным снижением $p_{m,a}/p_{c30}$ (в 1.5 раза) при $\alpha \approx 1$. Затем с ростом α значение $p_{m,a}/p_{c30}$ плавно подходит к пределу — $p_{m,a}/p_{c30} = 1.25$. Уменьшение $p_{m,a}/p_{c30}$ происходит при критическом истечении воздуха из щели вследствие проникновения в коллектор ударных волн, сопровождающих ПДВ [8], и тем более при докритическом его истечении, когда звуковые возмущения беспрепятственно проникают из камеры в коллектор.

Если считать, что полное давление в начале камеры сгорания равно статическому $p_{c0} \approx$

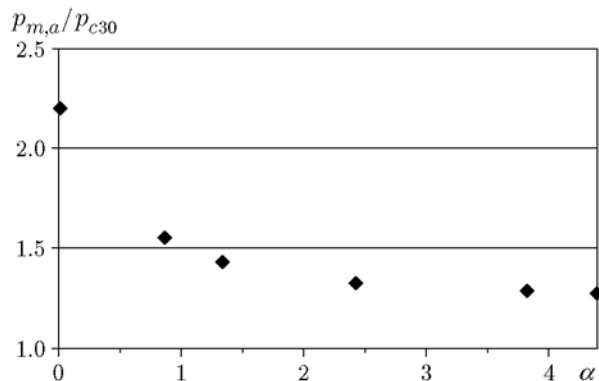


Рис. 7. Зависимость отношения $p_{m,a}/p_{c30}$ от добавочной подачи воздуха в продукты детонационного горения при сжигании горючего $\text{CH}_4/8\text{H}_2$, $g_\delta = 1000 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$

p_{c1} (топливовоздушная смесь и продукты не успели разогнаться вдоль камеры), то при $\alpha = 4.4$ (см. рис. 3,б, по линии 3) отношение давлений на щели составляет $p_{m,a}/p_{c1} = 1.15$, а в камере — $p_{c1}/p_{c30} \approx 1.1$. Это значит, что при $K_S = 5$ примерно 15 % полного давления потока теряется на щели и 10 % — в камере сгорания (всего около 25 %, см. рис. 7).

Для потока продуктов ниже области подачи добавочного воздуха расходное сопло уже не будет работать как эквивалентное геометрическому из-за перемешивания и теплообмена продуктов и воздуха. Более того, в потоке могут происходить и химические реакции как рекомбинации диссоциированных продуктов, так и их взаимодействия с кислородом воздуха (дополнительное тепловыделение). Фото-регистраграммы процесса при НСД и $\alpha > 0$ показывают, что нет явно выраженных ударных волн, отраженных от сужающейся части сопла и идущих вверх по потоку, которые могут заметно повлиять на течение в камере (ухудшать регулярность ПДВ [4]) и подъем давления в коллекторе.

3.3. Влияние добавочной подачи воздуха на удельный импульс

В камерах сгорания турбореактивных двигателей часть воздуха (около одной трети) подается для сжигания горючего в начале камеры, а остальная, большая часть воздуха расходуется на охлаждение стенок камеры (около одной трети) и охлаждение продуктов до температуры, приемлемой для лопаток турбины [2]. Известно, что масса вещества, вовлеченная в движущийся газ, например, при взрыве

на поверхности тела, увеличивает импульс, сообщенный телу [11]. Поэтому при добавочной подаче воздуха в продукты детонационного горения импульс тяги должен повышаться, что и наблюдалось в экспериментах.

В проведенных опытах с $\alpha > 0$ исходные компоненты горючей смеси подавались в камеру сгорания из ресиверов, на заполнение которых затрачивалась энергия компрессора. В реальных условиях в камеры сгорания ГТД и ПВРД поступает воздух, предварительно сжатый соответственно в компрессоре или воздухозаборнике. На это уходит часть полезной работы двигателя. Следовательно, необходим учет этой работы и выделение «чистого» удельного импульса, создаваемого при сжигании конкретного горючего независимо от системы его подачи в камеру сгорания. Для этого из величины силы, зафиксированной при детонационном горении — F_h (горячий выхлоп), вычитали силу, создаваемую при истечении холодного воздуха и горючего — F_c (холодный выхлоп). По разности этих сил F_{h-c} находили «чистый» удельный импульс.

Сила тяги определялась формулой [10]

$$F = \int_S [p + \rho v^2 - p_a] dS = (K p_{c30} - p_a) S_\Delta, \quad (1)$$

где ρ — плотность, v — скорость, p_a — противодавление, dS — площадь элементарной трубки тока, $K = (1 + \gamma M^2)/[1 + (\gamma - 1)(M^2/2)]^{\gamma/(\gamma-1)}$, M — число Маха, γ — показатель политропы (для продуктов $\gamma \approx 1.25$, для исходной газовой смеси $\gamma \approx 1.4$). Измеряя давление торможения p_{c30} и статическое давление p_{c3} на выходе из камеры, можно из соотношения $p_{c30}/p_{c3} = [1 + (\gamma - 1)(M^2/2)]^{\gamma/(\gamma-1)}$ оценить число Маха, а по формуле (1) определить силу тяги F и удельный импульс (в секундах) относительно расхода горючего: $I_{sp,f} = F/G_f/g$, где g — ускорение свободного падения.

На рис. 8 для смеси $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ — воздух представлены зависимости силы тяги «горячего» пуска (F_h), «холодного» пуска (F_c) и их разности (F_{h-c}), а также удельных импульсов $I_{sp,h} = F_h/G_f/g$ и $I_{sp,h-c} = F_{h-c}/G_f/g$ при добавочной подаче воздуха ($\alpha = 1.26 \rightarrow 0.64$) и без нее ($\alpha = 0$) от удельного расхода воздуха g_δ основной подачи воздуха. Соотношения компонентов в обоих случаях близки: $\phi_1 = 1.16 \rightarrow 0.7$ и $\phi_1 = 1.06 \rightarrow 0.89$ соответственно.

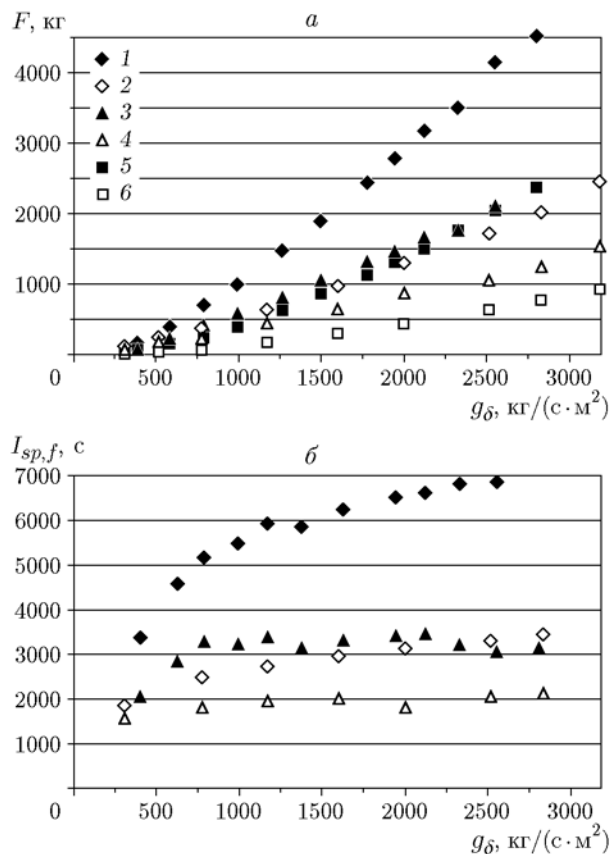


Рис. 8. Зависимости силы тяги «горячего» пуска, «холодного» пуска и разности этих сил (а), удельного импульса (б) от удельного расхода воздуха при НСД смеси $\text{CH}_4/\text{8H}_2$ — воздух:

а: 1, 2 — F_h , 3, 4 — F_{h-c} , 5, 6 — F_c ; б: 1, 2 — $I_{sp,h}$, 3, 4 — $I_{sp,h-c}$; светлые значки — $\alpha = 0$, темные — $\alpha = 1.26 \rightarrow 0.64$

С увеличением удельного расхода воздуха основной подачи через щель сила тяги растет. Видно, что значения F_h и F_{h-c} при добавочной подаче воздуха ($G_{a3} > 0$) почти вдвое больше, чем в случае без добавки ($G_{a3} = 0$). Что касается удельного импульса, то в заданном диапазоне g_δ импульс $I_{sp,h}$ растет, а импульс $I_{sp,h-c}$ увеличивается только в области докритического истечения из камеры сгорания, а затем стабилизируется на уровне $I_{sp,h-c} \approx 2000$ с при $G_{a3} = 0$ и $I_{sp,h-c} \approx 3300$ с при $G_{a3} > 0$. Более того, при максимальных удельных расходах g_δ и $\alpha > 0$ он даже уменьшается до $I_{sp,h-c} \approx 3000$ с. Таким образом, для близкого к стехиометрии соотношения компонентов смеси при учете работы сжатия исходных газов в ресивере при добавке воздуха в продукты сгорания ($\alpha = 1.26 \rightarrow 0.64$) получаем увеличение

удельного импульса минимум в 1.5 раза. Заметим, что в опытах истечение чистых продуктов и их смеси с воздухом из камеры сгорания происходило в режиме недорасширения ($p_{c3}/p_a = 3.1$ при $G_{a3} = 0$ и $p_{c3}/p_a = 7.42$ при $G_{a3} > 0$). Оценка при $\gamma = 1.33$ (средняя величина между $\gamma = 1.25$ продуктов и $\gamma = 1.4$ воздуха) и изэнтропическом расширении продуктов до 1 атм [10] дает в первом случае прирост удельного импульса (силы тяги) на 10 % (до 2200 с), а во втором — на 50 % (примерно до 5000 с). Таким образом, с учетом дальнейшего расширения продуктов в сопле удельные импульсы могут различаться более чем в два раза.

Рассмотрим зависимости удельного импульса от коэффициента избытка горючего ϕ_1 при $G_{a3} > 0$ для смесей водород — воздух и $\text{CH}_4/4\text{H}_2$ — воздух. Здесь и в дальнейшем будем рассматривать значения $I_{sp,f}$ только с учетом сжатия газов в ресиверах. Для этих смесей в области критического истечения продуктов величина добавки воздуха находилась в пределах $\alpha = 2.2 \pm 0.4$ (рис. 9).

Видно, что как для водорода при $\phi_1 = 0.61 \div 1.24$, так и для $\text{CH}_4/4\text{H}_2$ при $\phi_1 = 0.63 \div 1.07$ значения удельного импульса практически сливаются. С ростом коэффициента избытка водорода до $\phi_1 = 1.32 \div 1.45$ удельный импульс начинает уменьшаться. Однако сила тяги увеличивается пропорционально коэффи-

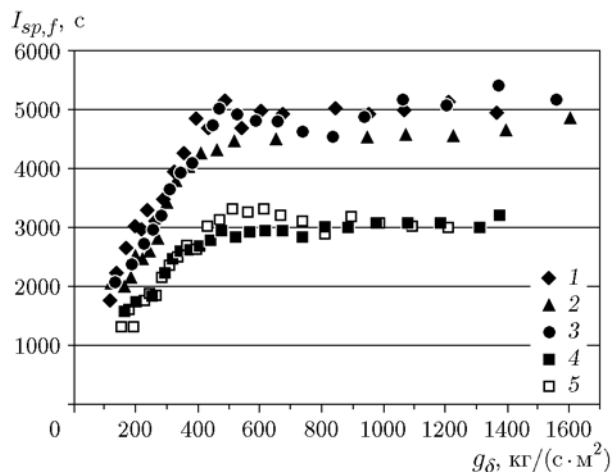


Рис. 9. Зависимость удельного импульса от удельного расхода воздуха основной подачи в смесях с H_2 или $\text{CH}_4/4\text{H}_2$ при различных коэффициентах избытка горючего:

H_2 : 1 — $\phi_1 = 1.24 \rightarrow 0.95$, 2 — $1.45 \rightarrow 1.32$, 3 — $0.61 \rightarrow 0.65$; $\text{CH}_4/4\text{H}_2$: 4 — $\phi_1 = 1.04 \rightarrow 1.07$, 5 — $0.63 \rightarrow 0.76$

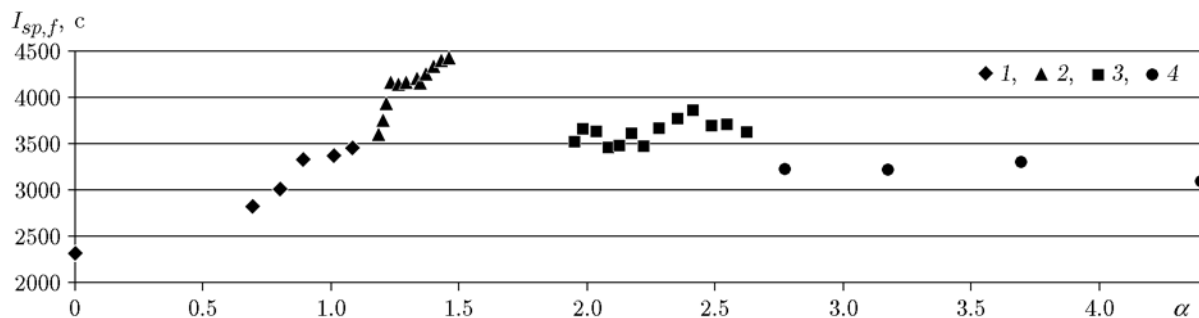


Рис. 10. Зависимость удельного импульса от степени добавки воздуха в продукты НСД смеси $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ — воздух:

1–4 соответствуют опытам 1–4 в табл. 1

циенту избытка горючего. По-видимому, часть избыточного горючего догорает в добавочном воздухе и подогревает продукты.

Представляет интерес зависимость удельного импульса от степени добавки воздуха в продукты. Наиболее полно ее можно отобразить для смеси $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ — воздух (рис. 10).

На рис. 10 приведены значения удельных импульсов из опытов, приведенных в табл. 1. Крайняя левая точка соответствует опыту при $\alpha = 0$ (см. рис. 8, б, кривая 1). Видно, что зависимость удельного импульса не монотонна, а имеет максимальное значение $I_{sp,f} \approx 4500$ с при $\alpha \approx 1.5$ и недостатке горючего (опыт 2, $\phi_1 = 0.72 \rightarrow 0.67$). Принимая во внимание, что $I_{sp,f}(g_\delta, \phi_1) \approx \text{const}$ при критическом истечении продуктов и $\phi_1 = 0.63 \div 1.07$ (см. рис. 8, б и 9), можно распространить значение этого максимума на смеси данного состава вплоть до стехиометрических и даже с небольшим избытком горючего (до $10 \div 20$ %).

Изменение силы тяги F_{h-c} в зависимости от удельного расхода воздуха в опытах 1–4 приведено на рис. 11. Видно, что в области $g_\delta \approx 700$ кг/(с·м²) значения силы тяги близки при всех рассмотренных подачах дополнительного воздуха в диапазоне $\alpha = 0.64 \div 4.63$. Однако при дальнейшем увеличении g_δ кривые силы тяги при больших значениях α располагаются ниже по отношению друг к другу. Эта область расходов g_δ соответствует критическому истечению продуктов и наиболее интересна для практических приложений. В области $g_\delta < 700$ кг/(с·м²) наблюдаем обратную картину по поведению силы тяги. Здесь существует околоскритическое и докритическое истечение продуктов.

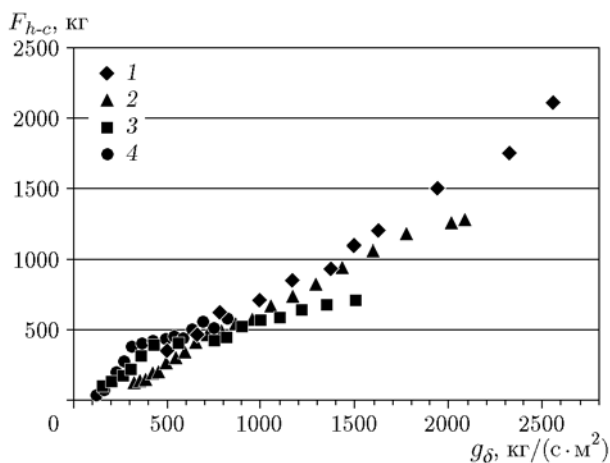


Рис. 11. Зависимость силы тяги F_{h-c} от удельного расхода воздуха основной подачи при различных добавках воздуха в продукты НСД смеси $\text{CH}_4/8\text{H}_2$ — воздух:

1–4 соответствуют опытам 1–4 в табл. 1

Зависимости удельного импульса от удельного расхода воздуха основной подачи для всех исследованных горючих в области стехиометрии и в диапазоне $\alpha = 2.2 \pm 0.4$ представлены на рис. 12. Верхняя и нижняя кривые приведены для H_2 и CH_4 соответственно. Видно, что с увеличением содержания водорода в бинарном горючем $\text{CH}_4/m\text{H}_2$ удельный импульс растет. В случае чистого метана ($m = 0$) происходит, по-видимому, его недогорание, вследствие чего зафиксированы очень низкие значения удельных импульсов — $I_{sp,f} \approx 1000$ с. Для водорода, наоборот, наблюдаем самые высокие удельные импульсы — $I_{sp,f} \approx 5000$ с. Установка сопла, обеспечивающего степень расширения продуктов от

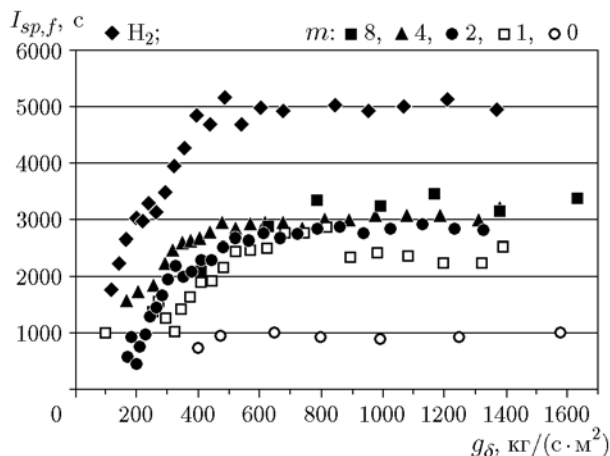


Рис. 12. Зависимость удельного импульса от удельного расхода воздуха основной подачи для исследованных горючих H_2 и CH_4/mH_2

$p_{c3}/p_a = 5.75$, позволит увеличить удельный импульс примерно на 50 % [10], т. е. до $I_{sp,f} \approx 7500$ с.

ВЫВОДЫ

В проточной цилиндрической камере ДК-500 при добавочной подаче воздуха в продукты сгорания впервые реализованы режимы непрерывной спиновой и многофронтной детонации с поперечными детонационными волнами смесей бинарного горючего CH_4/mH_2 с воздухом при содержании водорода $m = 8, 4, 2$ и 1. При НСД увеличиваются скорости поперечных волн. Нижний предел по содержанию водорода в бинарном горючем CH_4/mH_2 , при котором может реализоваться НСД, уменьшен до $m = 1$. Осуществлено сжигание чистого метана в камере сгорания, и впервые наблюдали режим «очагового» пламени, которое при снижении расходов воздуха переходило в сплошное турбулентное пламя. В режимах НСД реализовано сжигание смесей водород — воздух, нижний предел для непрерывной детонации по коэффициенту избытка горючего снижен до $\phi_1 \approx 0.4$, а суммарный коэффициент избытка горючего — до $\phi_\Sigma \approx 0.12$. Получено увеличение давления в камере сгорания и уменьшение перепада давления на щели подачи воздуха — $p_{m,a}/p_{c1} \approx 1.15$ при $\alpha = 4.4$. При добавочной подаче воздуха происходит прирост удельного импульса примерно в 1.5 раза, максимума он достигает вблизи $\alpha \approx 1.5$ и в области бедных смесей, но при условии существования НСД. С учетом дальнейшего

расширения продуктов в сопле различие в удельных импульсах может быть более двух раз. Значение удельного импульса практически постоянно от бедных по горючему смесей до близких к стехиометрии. Для богатых по горючему смесей удельный импульс уменьшается. Прирост силы тяги с увеличением удельного расхода воздуха уменьшается по мере роста добавки воздуха в продукты детонации при их критическом истечении из камеры сгорания. С увеличением содержания водорода в бинарном горючем CH_4/mH_2 удельный импульс растет. Для чистого водорода он достигает 5000 с, а с учетом присоединения сопла — 7500 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раушенбах Б. В., Белый С. А., Беспалов И. В., Бородачев В. Я., Волынский В. Я., Прудников А. Г. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1964.
2. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. — М.: Машиностроение, 2008. — Т. 2.
3. 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.
4. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F. Continuous spin detonation of methane/hydrogen-air mixtures with additional injection of air to combustion products // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — N 1128. — 012062. — DOI:10.1088/1742-6596/1128/1/012062.

-
9. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Способ детонационного сжигания топливных смесей и устройство для его осуществления: Пат. RU 2595004. Опубл. 20.08.2016; Бюл. № 23.
 10. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1976.
 11. **Станюкович К. П.** Неустановившиеся движения сплошной среды. — М.: Наука, 1971.

Поступила в редакцию 23.01.2019.

После доработки 06.03.2019.

Принята к публикации 17.04.2019.
