

УДК 534.222.2, 544.454.3

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА РЕЖИМЫ НЕПРЕРЫВНОЙ ДЕТОНАЦИИ СМЕСИ КЕРОСИН — НАГРЕТЫЙ ВОЗДУХ

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

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

В проточной кольцевой камере сгорания диаметром 503 мм при сужении выходного сечения и профилировании канала (установка каверн в начале или конце камеры) реализованы и исследованы режимы непрерывной многофронтной детонации керосина с нагретым до 800 К воздухом. Показано, что установка каверн повышала частоту поперечных волн. В координатах удельный расход воздуха — коэффициент избытка горючего определена область реализации детонационных режимов. Установлено, что существование режима непрерывной многофронтной детонации обусловлено столкновениями поперечных ударных волн, порождающих поперечные детонационные волны, которые перед столкновениями вырождаются в ударные волны. При установке каверны в конце кольцевой цилиндрической камеры получен максимальный удельный импульс относительно горючего 2040 с. Минимальная длина камеры сгорания, в которой реализуется режим непрерывной многофронтной детонации, находится в диапазоне $530 \div 670$ мм. Измерениями высокочастотными датчиками уровней пульсаций профилей давления в форкамере и на выходе из камеры сгорания определено, что они относятся к разряду звуковых колебаний. Это важно для применения детонационного горения в практических приложениях.

Ключевые слова: огневой нагрев воздуха, водород, жидкий керосин, непрерывная спиновая детонация, непрерывная многофронтная детонация.

DOI 10.15372/FGV2024.9441

EDN FFZHTR

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние экспериментальных исследований непрерывной спиновой детонации (НСД) в кольцевых камерах сгорания (КС) для топливовоздушных смесей (ТВС) представлено в работах [1–3]. Особый научный и практический интерес представляет исследование режимов НСД двухфазных смесей жидкий керосин — воздух, поскольку керосин является основным топливом для воздушно-реактивных двигателей. Режимы НСД гетерогенной смеси керосина с холодным воздухом впервые реализованы в вихревой плоскорадиальной КС диаметром 204 мм [1, 4]. Хорошо известно, что смеси жидкий керосин — воздух являются труднодетонируемыми. Поэтому первые исследования режимов НСД указанных смесей в кольцевых цилиндрических КС проводились при добавке к воздуху кислорода или при добавке к керосину водорода, изопропилнитрата и синтез-газа [5–8]. При детонационном сжигании керосина в холодном воздухе в кольцевой цилиндрической КС диаметром 503 мм (ДК-500) впервые наблюдали режимы непрерывной многофронтной детонации (НМД) [9]. В газотурбинных двигателях (ГТД) и прямоточных воздушно-реактивных двигателях (ПВРД) в КС подается нагретый воздух [10]. Поэтому в последнее время активно проводятся исследования детонационных режимов смесей углеводородное горючее — нагретый воздух в кольцевых КС [11–14]. Так, в работе [11] при температуре нагретого до 393 К воздуха и предварительном испарении жидкого топлива

(бензин, керосин) реализованы устойчивые детонационные режимы сжигания в КС диаметром 225 мм, длиной 300 мм. В комбинации стандартного турбореактивного двигателя (ТРД) ТЖ100S-125 и детонационной форсажной КС диаметром 220 мм в составе этого двигателя при расходе воздуха 1.2 кг/с и температуре 473 К реализовано детонационное сжигание керосина [12]. В кольцевых цилиндрических камерах диаметром 220 и 500 мм при расходах воздуха 1.0 и 2.56 кг/с, нагретого до температуры $500 \div 520$ К, наблюдали режим сжигания керосина во встречных детонационных волнах [13]. Режимы НМД гетерогенной смеси авиационного керосина (ТС-1) с горячим воздухом, предварительно нагретым огневым способом в форкамере от 600 до 1200 К при расходах воздуха до 25 кг/с, были реализованы и исследованы в проточной кольцевой камере диаметром 503 мм и длиной 600 мм [14]. Получены режимы НМД с одной парой (частота 1.2 ± 0.1 кГц) или двумя парами (частота 2.4 ± 0.2 кГц) сталкивающихся поперечных детонационных волн. По измеренным на выходе из КС давлениям (статическому и торможения) определены сила тяги и удельные импульсы. Показано, что увеличение температуры воздуха способствует детонационному сжиганию двухфазной смеси керосин — воздух, однако при этом возрастает степень диссоциации продуктов сгорания и уменьшается удельный импульс силы тяги. Обоеднение смеси горючим повышает удельный импульс, а его максимальное значение с учетом энергии сжатого воздуха в ресиверах составило около 2200 с при температуре воздуха 600 К.

Для интенсификации горения в камерах сгорания ГТД и ПВРД используют уступы или специальные стабилизаторы пламени, за которыми формируются вихревые зоны горячих продуктов, поддерживающих горение [10, 15]. Положительное влияние резонатора (замкнутой цилиндрической полости, ориентированной перпендикулярно КС) на тяговые характеристики модели ПВРД отмечено в работе [16]. В проточной кольцевой КС диаметром 170 мм с резонатором (выемкой во внутренней стенке в начале КС) при расходе воздуха 1.0 кг/с и температуре 860 К исследованы детонационные режимы сжигания керосина [17]. В широком диапазоне коэффициента избытка горючего $\phi = 0.77 \div 1.47$ получены детонационные режимы со скоростью распространения вращающихся детонационных волн, составляющих примерно 60 % от теоретической скорости детонации Чепмена — Жуге.

Цель работы — определить влияние геометрии кольцевой цилиндрической камеры сгорания диаметром 503 мм (профиля канала, длины канала) на осуществление режимов непрерывной детонации смеси авиационный керосин (ТС-1) — подогретый воздух; определить влияние детонационных волн в КС на систему подачи нагретого воздуха и истекающих продуктов на срезе КС с помощью высокочастотных датчиков давления. Предварительный огневой подогрев воздуха до температуры торможения $T_p = 800$ К осуществлялся аналогично [14] в кольцевой форкамере сжиганием водорода в воздухе, обогащенном кислородом, в стехиометрическом соотношении с добавочным кислородом.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Организацию детонационного горения двухфазной смеси керосин — горячий воздух осуществляли в проточной кольцевой камере сгорания ДК-500 наружным диаметром $d_{c1} = 503$ мм и длиной $L_c = 600$ мм с форкамерой на ее входе.

Геометрические параметры базовой КС и форкамеры с системой подачи воздуха и керосина, а также их расходы полностью соответствовали [14]. Жидкое горючее (ТС-1) подавалось из расходомера поршневого типа через форсунку с равномерно распределенными и попарно направленными встречно под углом 90° отверстиями — $600 \times 0.35 \times 1.43$ мм [9]. Воздух через кольцевой зазор шириной $\delta = 10.5$ мм и площадью проходного сечения $S_\delta = 162.5$ см² поступал в коаксиальный канал КС шириной $\Delta = 58$ мм. Выход КС

формировался диском, создающим кольцевую щель шириной $\Delta_{ex} = 31.5$ мм и площадью $S_{ex} = 466.6$ см².

Начальные расходы компонентов ТВС составляли: обогащенного кислородом воздуха — $G_{ao,0} \approx 24$ кг/с, водорода — $G_{H_0} \approx 0.19$ кг/с, керосина — $G_{f0} \approx 0.96 \div 1.92$ кг/с. Текущие расходы воздуха G_{ao} , обогащенного кислородом, а также водорода G_H за время около 0.2 с уменьшались в 2 раза, а керосина примерно в 1.3 раза. Поэтому коэффициент избытка керосина ϕ возрастал к концу эксперимента. Определялись также текущие удельные расходы нагретого воздуха через щель $g_\delta = (G_{ao} + G_H)/S_\delta$.

Фотосъемка процесса велась высокоскоростной камерой Photron FASTCAM SA5 в режиме съемки 420 000 кадр/с через семь продольных окон из оргстекла, расположенных друг за другом вдоль стенки КС. Ширина каждого окна 20 мм, длина 93 мм. Расстояние между окнами — 24 мм. Эти окна охватывали как форкамеру, так и КС. Размеры окон служили масштабом происходящих явлений.

В системе подачи, аналогично [14], низкочастотными датчиками фирмы «Trafag» измерялось статическое давление: в ресиверах воздуха, обогащенного кислородом ($p_{r,a1}$, $p_{r,a2}$), водорода ($p_{r,H}$), воздуха, вытесняющего керосин из расходомера ($p_{r,fa}$), а также в коллекторах обогащенного кислородом воздуха ($p_{m,a}$) и керосина ($p_{m,f}$). Регистрировался ход поршня L_p расходомера с керосином, по которому определялся расход керосина. В форкамере измерялось полное давление (p_p) на расстоянии 90 мм перед входной щелью в КС, а также измерялась хромель-алюмелевыми термопарами температура торможения воздуха при огневом его подогреве (T_p). Осциллограммы температуры и давления в форкамере приведены в [14]. В КС измерялись статическое давление в начале камеры p_{c1} (в 110 мм от переднего торца) и в конце p_{c3} , а также полное давление p_{c30} на выходе из КС. На тех же расстояниях от щели подачи воздуха измерялось давление высокочастотными датчиками типа Kulite ХТЕН-10L-190 (М) Series с собственной частотой колебаний 1.4 МГц и температурой допустимого нагрева до 538 °С. По окружности КС они были сдвинуты от окон на 240 мм против часовой стрелки со стороны переднего торца КС.

Для определения влияния геометрии КС на реализацию режима НМД исследованы два новых типа кольцевой КС: с кольцевой каверной на входе и выходе из камеры. Все схемы КС представлены на рис. 1, а их геометрические параметры приведены в табл. 1: Δ_{S1} и L_{S1} — высота и длина каверны на входе в КС; Δ_{S2} и L_{S2} — высота и длина каверны на выходе из КС; $K_S = S_{\Delta1}/S_\delta$ — степень расширения канала КС на входе; $K_{ex} = S_{\Delta2}/S_{ex}$ — степень сужения канала КС на выходе. Здесь $S_{\Delta1} = \pi(d_{c1} - \Delta - \Delta_{S1})(\Delta + \Delta_{S1})$; $S_{\Delta2} = \pi(d_{c1} - \Delta - \Delta_{S2})(\Delta + \Delta_{S2})$.

В одной серии опытов рассматривалась КС с зазором $\Delta = 58$ мм (рис. 1,а), а в другой — $\Delta = \Delta_{ex} = 31.5$ мм (рис. 1,б). На рис. 1 и в табл. 1 приведены также схема и параметры базовой КС № 1, исследованной в [14]. Опыты проводились с пониженным и повышенным расходом керосина при одинаковом изменении расхода воздуха. Данные опытов, проведенных с указанными на рис. 1 геометриями КС, сравнивались по механизму сжигания керосина и удельному импульсу.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Режимы сжигания керосина в КС № 2, 3

Первая серия экспериментов с огневом подогревом воздуха в форкамере до температуры торможения $T_p = 800$ К была проведена в КС № 2 (каверна в конце КС) и № 3 (каверна в начале) при $\Delta = 58$ мм. Параметры процессов в двухфазной смеси керосин —

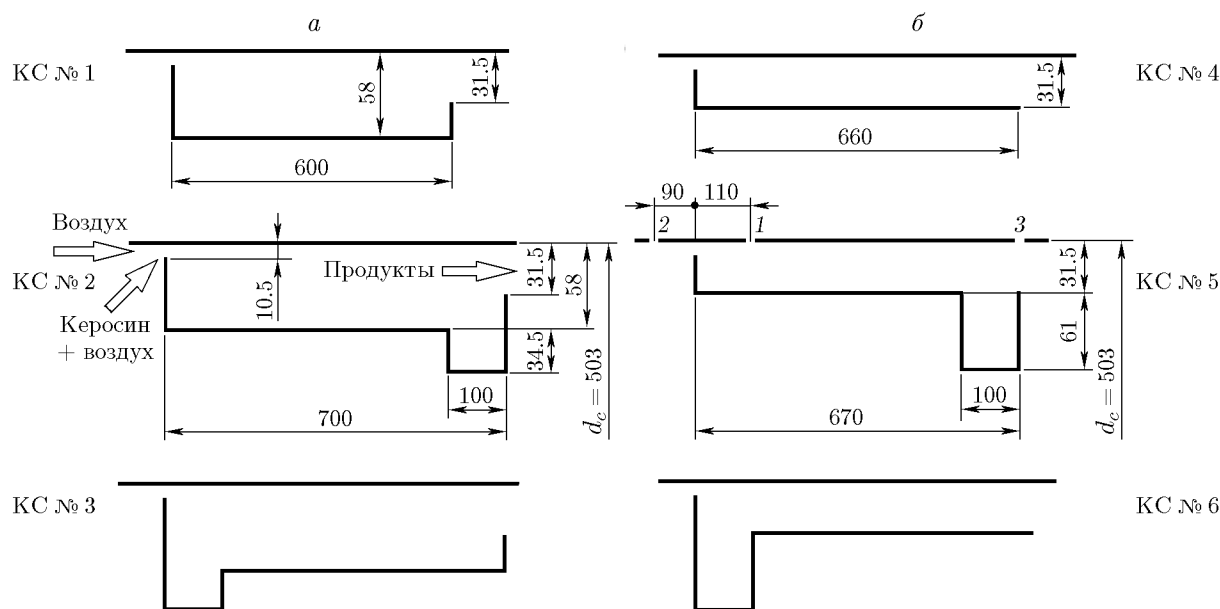
Рис. 1. Схемы кольцевых камер сгорания с зазором $\Delta = 58$ мм (а) и $\Delta = 31.5$ мм (б)

Таблица 1

Геометрические параметры исследованных кольцевых КС
 ($d_{c1} = 503$ мм; $\delta = 10.5$ мм; $\Delta = 58$ или 31.5 мм; $L_c = 600 \div 700$ мм; $\Delta_{ex} = 31.5$ мм)

Номер КС	Δ , мм	L_c , мм	K_S	Δ_{S1} , мм	L_{S1} , мм	Δ_{S2} , мм	L_{S2} , мм	K_{ex}
1 [14]	58	600	5	0	0	0	0	1.74
2	58	700	5	0	0	34.5	100	2.56
3	58	700	7.34	34.5	100	0	0	1.74
4	31.5	660	2.87	0	0	0	0	1.0
5	31.5	670	2.87	0	0	61	100	2.56
6	31.5	670	7.34	61	100	0	0	1.0

подогретый воздух представлены в табл. 2. В обеих КС реализован режим НМД со встречными поперечными детонационными волнами (ПДВ), вращающимися в противоположные стороны и сталкивающимися друг с другом. Также для богатой по горючему смеси наблюдали режим дозвукового горения (ДГ).

В КС № 2 при температуре торможения воздуха $T_p \approx 800$ К в форкамере, при удельных расходах нагретого воздуха через щель на входе в КС $g_\delta = 1618 \rightarrow 633$ кг/(с·м²) и коэффициентах избытка горючего $\phi = 0.72 \rightarrow 1.43$ были осуществлены режимы НМД с частотой встречных ПДВ $f \approx 4.05 \rightarrow 4.22 \rightarrow 1.25$ кГц.

Характерная фоторегистрограмма режима НМД при $g_\delta = 1340$ кг/(с·м²) и $\phi = 0.82$ приведена на рис. 2. В верхней части фоторегистрограммы (в первом окне рис. 2а) отображено яркое свечение процесса горения водорода в форкамере, подсвеченное продуктами горения ацетилена в кислороде. Нижняя часть фоторегистрограммы (2/3 четвертого окна и три полных окна) отображает свечение режима НМД в КС со встречными ПДВ, например, А и А¹ (вертикальные светящиеся объекты). Область их отражения на переднем торце КС отмечается яркими вспышками.

Таблица 2

Параметры НМД и ДГ двухфазной смеси керосин — подогретый воздух ($T_p = 800$ К) в КС № 1–3

Номер КС	p_p/p_a	g_δ , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	$\langle D \rangle$, км/с	$p_{сз}/p_a$	$p_{с30}/p_a$	Режим
1 [14]	9.38 → 7.0	1416 → 1 110	0.9 → 1.04	2.5 → 2.31	4	0.99 → 0.92	3.64 → 2.8	7.05 → 5.68	НМД
	7.0 → 4.74	1 110 → 783	1.04 → 1.19	1.25 → 1.18	2	1.23 → 0.93	2.8 → 2	5.68 → 3.82	НМД
	8.92 → 4.3	1 343 → 666	0.68 → 1.0	1.29 → 1.23	2	1.02 → 0.97	3.3 → 2.4	6.19 → 4.62	НМД
2	10.75 → 9.63	1 618 → 1 402	0.72 → 0.8	4.05 → 4.22	6	1.06 → 1.11	4.1 → 3.8	7.38 → 6.93	НМД
	9.63 → 5.65	1 402 → 815	0.8 → 1.2	2.48 → 2.03	4	0.98 → 0.8	3.8 → 2.32	6.93 → 4.15	НМД
	5.65 → 4.19	815 → 633	1.2 → 1.43	1.29 → 1.25	2	1.0 → 0.98	2.32 → 1.75	4.15 → 3.16	НМД
	11.3 → 8.38	1 454 → 1 097	1.26 → 1.54	1.36 → 1.23	2	0.94	4.33 → 3.13	7.79 → 5.6	НМД
	<8.38	<1 097	>1.54	—	—	—	<3.13	<5.6	ДГ
3	11.43 → 9.96	1 534 → 1 327	0.7 → 0.77	4.46	8	0.94	4.18 → 3.76	7.53 → 6.74	НМД
	9.96 → 7.51	1 327 → 1 004	0.77 → 0.94	3.5 → 3.76	6	0.92 → 0.99	3.76 → 2.92	6.74 → 5.25	НМД
	7.51 → 6.68	1 004 → 878	0.94 → 1.03	2.36	4	0.93	2.92 → 2.58	5.25 → 4.61	НМД
	6.68 → 4.38	878 → 596	1.03 → 1.34	1.23 → 1.18	2	0.97 → 0.93	2.58 → 1.68	4.61 → 2.99	НМД
	<4.38	<596	>1.34	—	—	—	<1.68	<2.99	ДГ
	10.5 → 7.74	1 351 → 1 062	1.08 → 1.28	2.51 → 2.71	4	0.99 → 1.07	4.16 → 3.05	7.48 → 5.34	НМД
	7.74 → 4.5	1 062 → 626	1.28 → 1.69	1.3 → 1.1	2	1.03 → 0.87	3.05 → 1.72	5.34 → 3.1	НМД
	<4.5	<626	>1.69	—	—	—	<1.72	<3.1	ДГ

Примечания. p_a — атмосферное давление, n , f и $\langle D \rangle$ — количество, частота и средняя скорость ПДВ; стрелками показано изменение параметров в течение эксперимента.

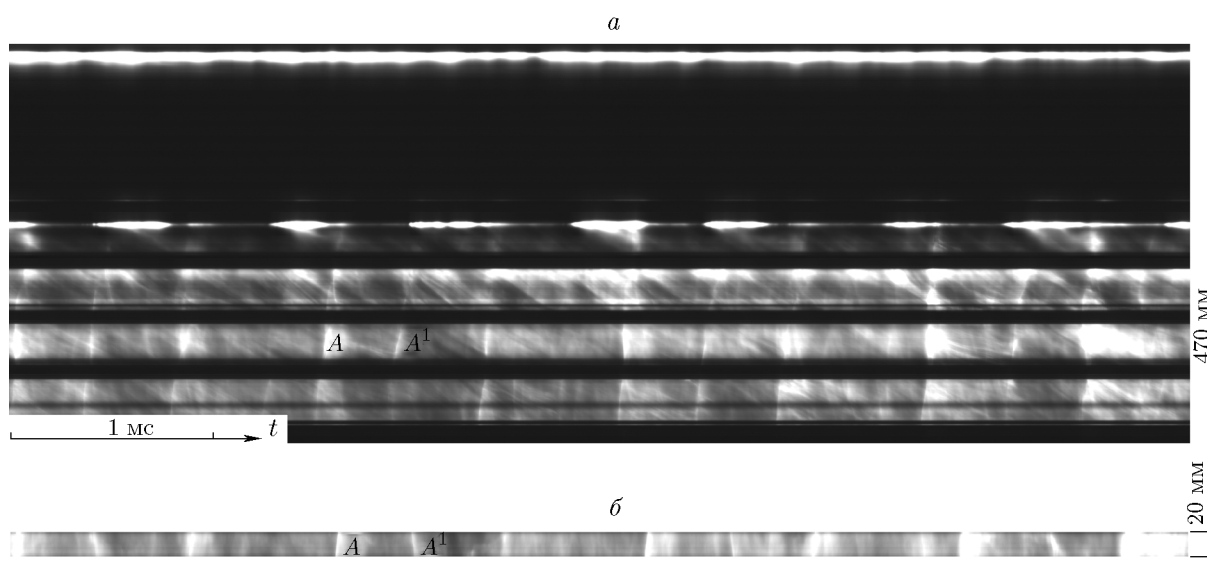


Рис. 2. Фоторегистрограмма процесса НМД в КС № 2 (фрагмент) ($g_\delta = 1340$ кг/(с·м²), $\phi = 0.82$, $n = 4$, $\langle D \rangle = 0.99$ км/с, $f = 2.48$ кГц):

a — съемка через продольные окна, b — $(x-t)$ -диаграмма движения волн, снятая поперек 6-го (предпоследнего) окна

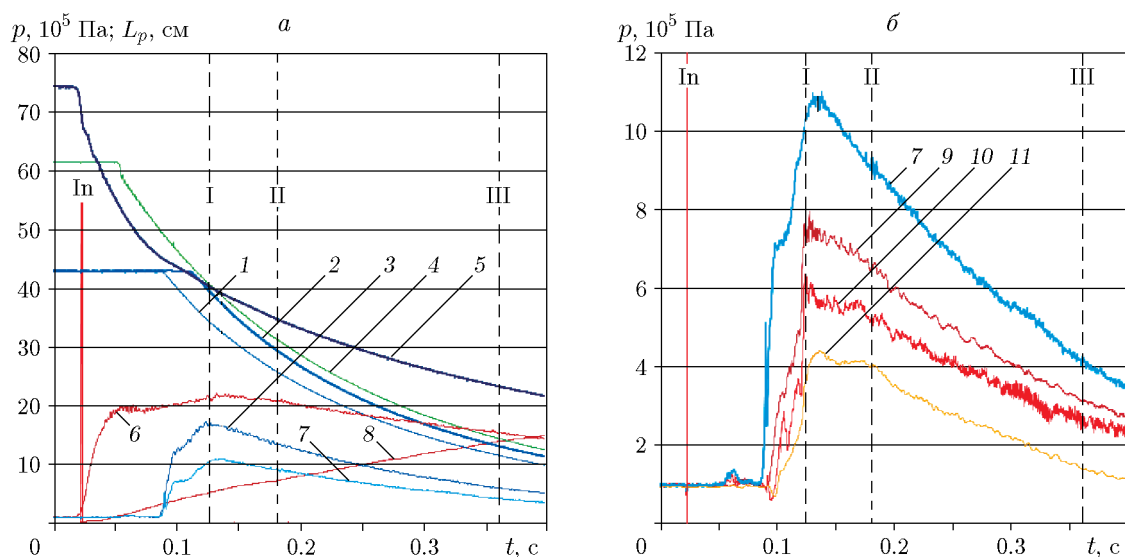


Рис. 3. Временные истории давления в системе подачи компонентов смеси (а), в форкамере и КС (б):

1 — $p_{r,a1}$, 2 — $p_{r,a2}$, 3 — $p_{m,a}$, 4 — $p_{r,n}$, 5 — $p_{r,f}$, 6 — $p_{m,f}$, 7 — p_p , 8 — ход поршня L_p , 9 — p_{c30} , 10 — p_{c1} , 11 — p_{c3} , In — инициирование горения в форкамере и КС, I, II — начало и конец истечения нагретого до $T_p \approx 800$ К воздуха, III — параметры процесса, соответствующие фоторегистрограмме на рис. 2

На $(x-t)$ -диаграмме (рис. 2, б) видно встречное движение волн, причем с разными скоростями (неодинаковый наклон разверток), отличающимися от средней $\langle D \rangle = 0.99$ км/с. Светлые и темные диагональные линии — это траектории продуктов сгорания. Черные горизонтальные линии (ширина 24 мм) — непрозрачные участки КС между окнами. В КС наблюдается очень нерегулярная структура поперечных волн, как и в классической многофронтной детонации [18]. За определенный период времени по появлению явно выраженных детонационных волн против окон определялись их частота f и средняя скорость $\langle D \rangle$. Значения частоты сверялись с данными осциллограмм, зафиксированными датчиками полного давления на выходе из КС [14]. При этом точность измерения частоты и средней скорости ПДВ повышалась до нескольких процентов. При изменении $\phi = 0.72 \div 1.54$ обнаружено от трех ($n = 6$) до одной пары ($n = 2$) сталкивающихся волн. При $\phi > 1.54$ наблюдалось ДГ. Как обычно, при НМД сталкивающиеся волны нерегулярны и имеют среднюю скорость между столкновениями $D \approx 1.0$ км/с.

На рис. 3 представлены осциллограммы давления в системе подачи, в форкамере и КС, которым соответствует фоторегистрограмма на рис. 2. Отсчет времени соотносится с запуском системы регистрации и программного устройства. При открытии клапана подачи воздуха ($t \approx 25$ мс) жидкий керосин вытеснялся из расходомера и перемешивался с воздухом в смесителе. Образующаяся двухфазная смесь подавалась в КС. Почти одновременно поджигались струи смеси ацетилена и кислорода, продукты горения которых направлялись в форкамеру и КС для инициирования горения и подсветки процесса в течение эксперимента. Затем в форкамеру подавался водород (кривая 4 на рис. 3, а), а за ним воздух, обогащенный кислородом (кривые 1, 2). Образующиеся в форкамере и КС смеси поджигались струями продуктов горения ацетилена в кислороде. В течение ≈ 30 мс в КС развивалось дозвуковое горение, переходящее в режим НМД. На рис. 3 вертикальными линиями отмечены момент инициирования (In), начало (I) и конец процесса (III)

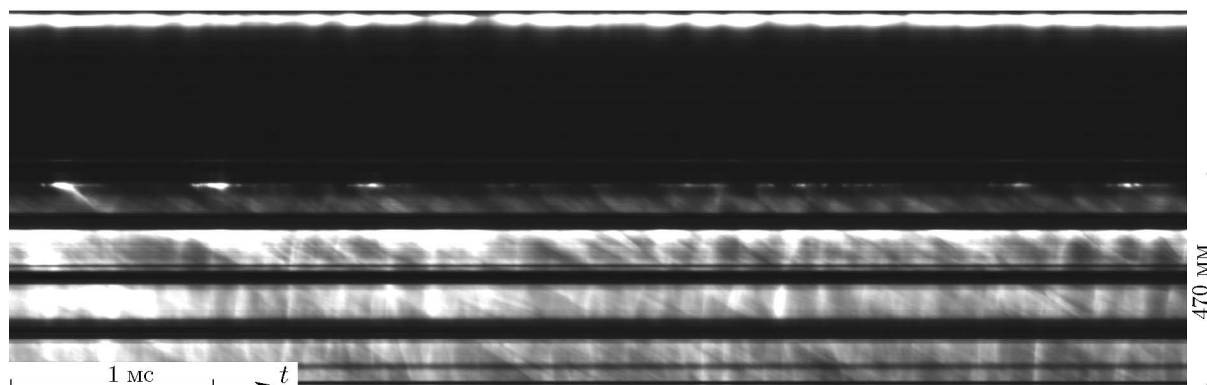


Рис. 4. Фоторегистрограмма процесса НМД в КС № 3 (фрагмент) ($g_\delta = 1153 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 0.86$, $n = 6$, $\langle D \rangle = 0.97 \text{ км}/\text{с}$, $f = 3.68 \text{ кГц}$)

при сохранении температуры $T_p \approx 800 \text{ К}$, а также время (II), соответствующее НМД на фрагменте фоторегистрограммы на рис. 2.

По уровням давления в КС (рис. 3,б) видно, что истечение из форкамеры в КС (кривые 7, 10) и из КС в атмосферу (кривые 9, 11) — критическое. Датчики среднего давления в КС явно фиксируют наличие колебаний в камере. По специальной программе проводилось сглаживание зафиксированных колебаний, осредненные значения которых приведены в табл. 2.

При установке каверны в начале камеры (КС № 3) также наблюдали режим НМД, однако заметно проявилось обычное горение в области каверны, а число пар волн в начале процесса увеличилось до четырех ($n = 8$). По мере уменьшения удельных расходов воздуха g_δ и увеличения коэффициента избытка горючего ϕ число волн уменьшалось до двух, а при $\phi > 1.69$ детонация переходила в режим ДГ.

Характерная фоторегистрограмма процесса (фрагмент) приведена на рис. 4. Осциллограммы давлений в системе подачи и в КС практически не отличались от приведенных на рис. 3.

2.2. Режимы сжигания керосина в КС № 4–6

Вторая серия экспериментов была проведена при $\Delta = \Delta_{ex} = 31.5 \text{ мм}$ (КС № 4–6, табл. 3). До установки каверны проверялась возможность детонационного сжигания керосина в КС с кольцевым каналом постоянного поперечного сечения (КС № 4). Установлено, что с уменьшением удельного расхода воздуха $g_\delta = 1860 \rightarrow 719 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и увеличением коэффициента избытка горючего $\phi = 0.84 \rightarrow 1.26$ в начале КС развивается горение в сверхзвуковом потоке (ГСП) (рис. 5,а), а затем — дозвуковое горение (рис. 5,б).

Светящиеся наклонные линии — траектории продуктов, представляющие собой $(x-t)$ -диаграммы движения частиц продуктов вдоль окон. По наклону этих линий к оси времени определяется скорость продуктов v . При ГСП она уменьшается от начала к концу КС — $v \approx 830 \rightarrow 600 \text{ м}/\text{с}$. Переход в режим ДГ происходит не сразу, а постепенно, по мере усиления скачков уплотнения в горячей смеси и проникновения скачка уплотнения из внешней среды в КС (рис. 5,б). При этом скорость потока снижается до $v < 330 \text{ м}/\text{с}$.

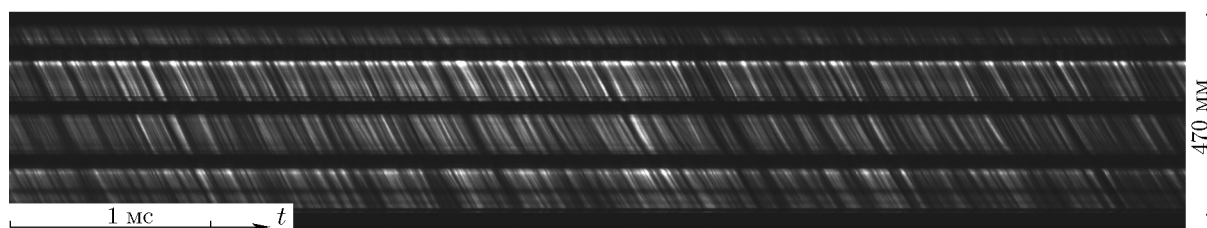
На рис. 6 представлены осциллограммы статического давления в начале КС № 4 (кривая 1), статического (кривая 2) и полного давления (кривая 3) на выходе из КС. Характерной особенностью ГСП является понижение в начале КС статического давления ниже начального при отношении $p_{m,a}/p_{c1} \gg 2$. При этом отношение полного давления p_{c30} к статическому p_{c3} на выходе из КС составляет $p_{c30}/p_{c3} > 2$. Статическое давление в начале

Таблица 3

Параметры НМД, ГСП и ДГ двухфазной смеси керосин — подогретый воздух ($T_p = 800$ К) в КС № 4–6

Номер КС	p_p/p_a	g_δ , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	$\langle D \rangle$, км/с	$p_{с3}/p_a$	$p_{с30}/p_a$	Режим
4	11.6 → 6.34	1860 → 930	0.84 → 1.05	—	—	—	1.1 → 0.87	4.8 → 3.06	ГСП
	6.34 → 4.7	930 → 719	1.05 → 1.26	—	—	—	0.87 → 0.76	3.06 → 1.56	ДГ
5	10.2 → 7.84	1476 → 1117	0.67 → 0.91	2.14 → 2.0	4	0.85 → 0.79	3.7 → 2.83	7.56 → 5.62	НМД
	7.84 → 6.0	1117 → 856	0.91 → 1.15	1.51 → 1.43	2	1.19 → 1.13	2.83 → 2.14	5.62 → 4.12	НМД
	10.6 → 9.08	1451 → 1261	0.94 → 1.16	2.1 → 2.08	4	0.83 → 0.82	3.88 → 3.16	7.82 → 6.57	НМД
	9.08 → 7.54	1261 → 1099	1.16 → 1.34	1.36 → 1.01	2	1.07 → 1.01	3.16 → 2.05	6.57 → 5.1	НМД
	<7.54	<1099	>1.34	—	—	—	<2.05	<5.1	ДГ
6	11.11 → 4.5	1554 → 692	0.86 → 1.3	—	—	—	4.41 → 2.09	8.26 → 3.5	ДГ
	11.43 → 4.63	1604 → 715	1.14 → 1.69	—	—	—	4.5 → 1.69	8.18 → 2.7	ДГ

а



б

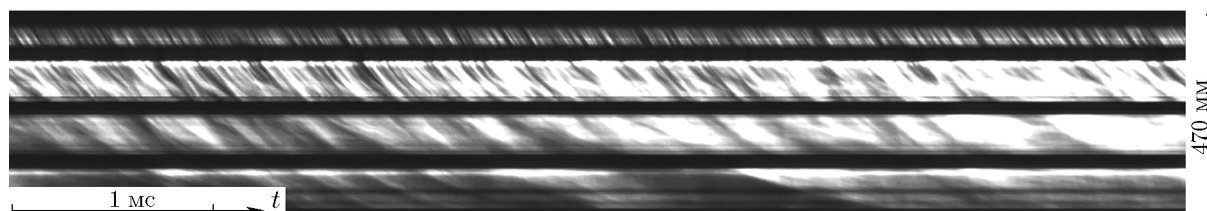


Рис. 5. Фоторегистрограмма процесса горения в КС № 4 (фрагмент):

а — ГСП, $g_\delta = 1617$ кг/(с·м²), $\phi = 0.84$; б — ДГ, $g_\delta = 817$ кг/(с·м²), $\phi = 1.06$

КС (кривая 1) выравнивается с полным давлением при проникновении скачка уплотнения из внешней среды внутрь КС. Параметры процесса представлены в табл. 3.

Установка каверны на выходе из камеры (КС № 5) позволила реализовать детонационный режим сжигания керосина. На рис. 7 приведен фрагмент типичной фоторегистрограммы процесса. Как видно из фоторегистрограммы и $(x-t)$ -диаграммы, столкновения между волнами A и A^1 происходят вблизи окон (малое расстояние между ними). С уменьшением g_δ и увеличением ϕ число волн уменьшалось от $n = 4$ до $n = 2$, а при $\phi > 1.34$ детонация переходила в режим ДГ. Осциллограммы давления в системе подачи и в КС близки к изображенным на рис. 3 для КС № 2. Параметры процесса представлены в табл. 3.

При установке каверны в начало камеры (КС № 6) наблюдали обычное ДГ со слабыми акустическими волнами во всем диапазоне расходов компонентов и коэффициентов избытка горючего (рис. 8). Осциллограммы давления в системе подачи и в КС близки

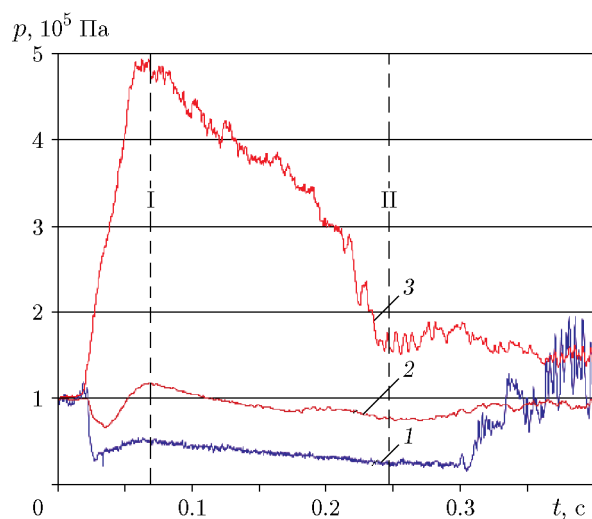


Рис. 6. Осциллограммы давления в КС:
1 — p_{c1} , 2 — p_{c3} , 3 — p_{c30} ; I — ГСП
(см. рис. 5,а), II — переход от ГСП к ДГ внут-
ри КС (см. рис. 5,б)

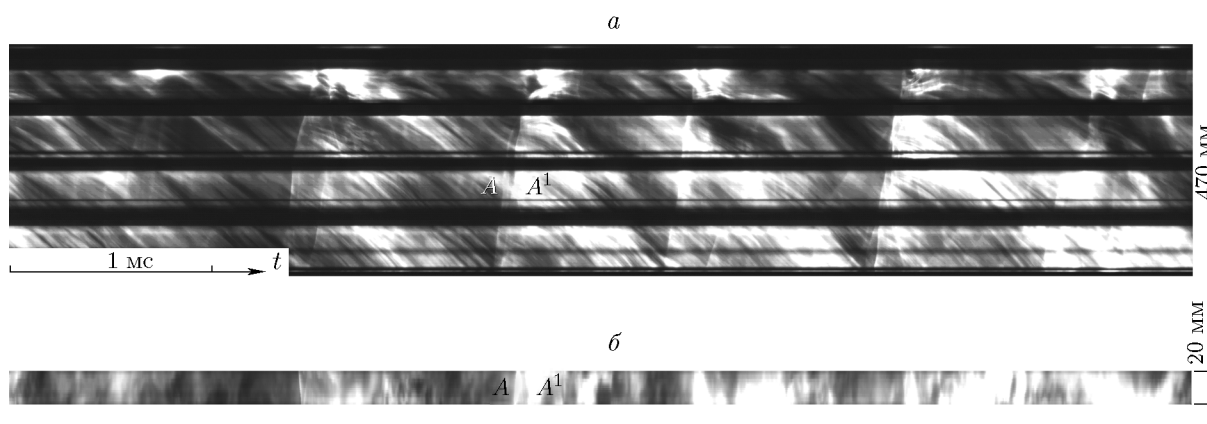


Рис. 7. Фоторегистрограмма процесса НМД в КС № 5 (фрагмент) ($g_\delta = 1476 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 0.67$, $n = 4$, $\langle D \rangle = 0.84 \text{ км}/\text{с}$, $f = 2.14 \text{ кГц}$):

а — съемка через продольные окна, б — $(x-t)$ -диаграмма движения волн, снятая поперек окна на расстоянии 300 мм от входа в КС

к приведенным на рис. 3. Диапазоны изменения параметров режима в процессе горения приведены в табл. 3.

Определено влияние длины КС на реализацию режима непрерывной детонации. Опыты проводились в КС № 5 с изменением ее длины L_c в последовательности 300, 440, 530 и 670 мм при пониженных и повышенных расходах керосина. Во всех случаях при $L_c < 670$ мм наблюдалось ГСП, переходящее к ДГ при входе скачка уплотнения внутрь

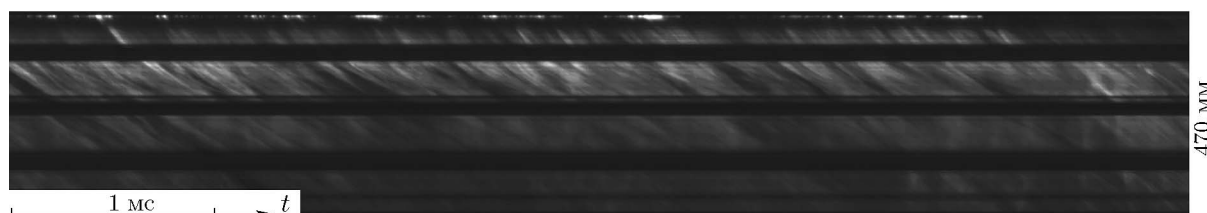


Рис. 8. Фоторегистрограмма процесса дозвукового горения в КС № 6 (фрагмент)
($g_\delta = 1554 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 0.86$)

КС (см. рис. 5). Таким образом, минимальная длина КС, при которой реализуется режим НМД, находится в пределах $L_c = 530 \div 670$ мм.

2.3. Регистрация профилей давления детонационных и ударных волн

С целью определения воздействия детонационных волн в КС на систему подачи из форкамеры и на поток продуктов при их истечении из КС выполнены измерения профилей давления детонационных и ударных волн высокочастотными датчиками давления. Опыты проводили в КС № 5 при близких параметрах процесса, приведенных в табл. 3. Датчики давления (см. 1–3 на рис. 1, б, КС № 5) устанавливались заподлицо с внутренней поверхностью наружной стенки КС на расстоянии 90 мм перед входной щелью в КС, в 110 мм от переднего торца и в конце КС. На этих же расстояниях находились низкочастотные датчики фирмы «Trafag», измеряющие средние давления, по которым нормировались величины осредненного давления высокочастотных колебаний. Охлаждение чувствительного элемента высокочастотных датчиков осуществлялось плоской струей холодного воздуха, подаваемой вдоль стенки камеры перед датчиком в направлении основного потока продуктов. Сигналы с датчиков усиливались двухканальным согласующим усилителем с модулем компенсации кавитации Kulite KSC-2-C3 (для двух датчиков) и специально разработанным дифференциальным усилителем сигнала (для одного датчика).

Характерная фоторегистрограмма детонационного процесса (фрагмент) и соответствующие ей осциллограммы высокочастотных колебаний давления в КС (p_{c1}), в форкамере (p_p) и на выходе из КС (p_{c3}) приведены на рис. 9.

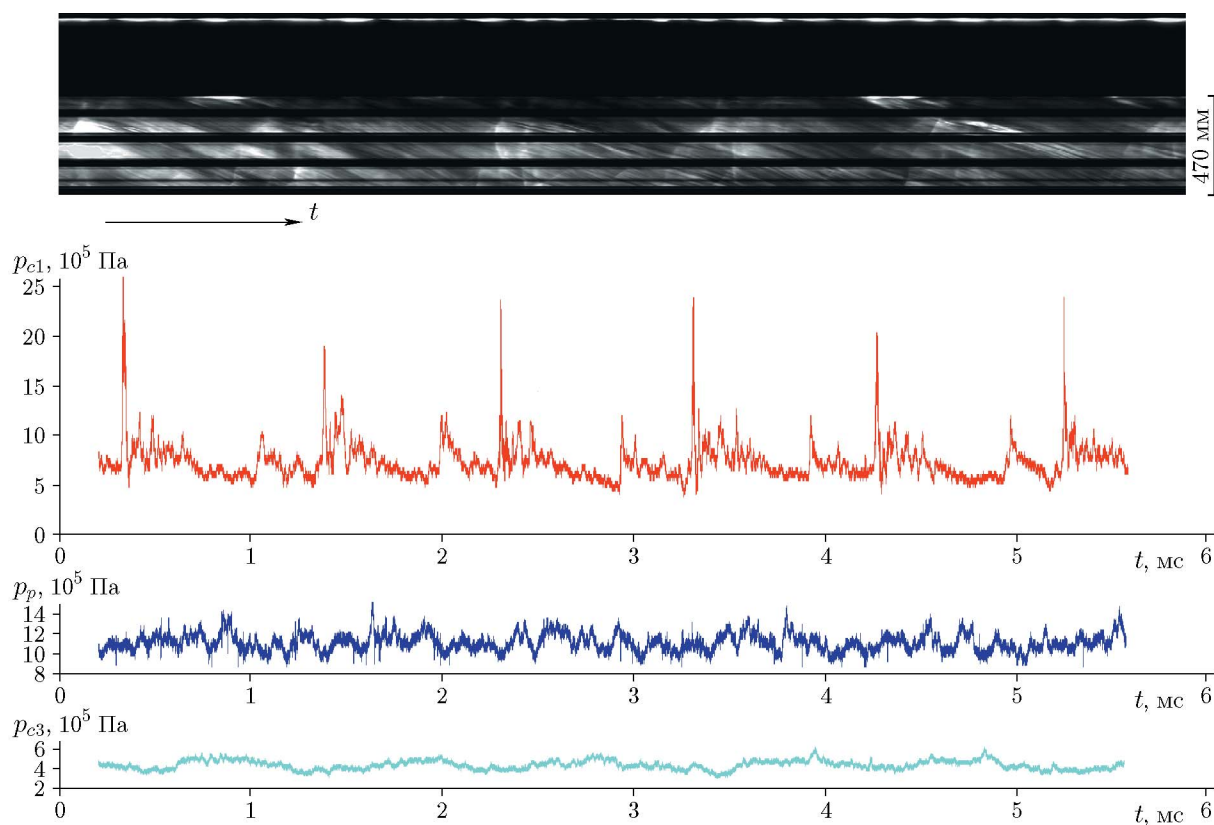
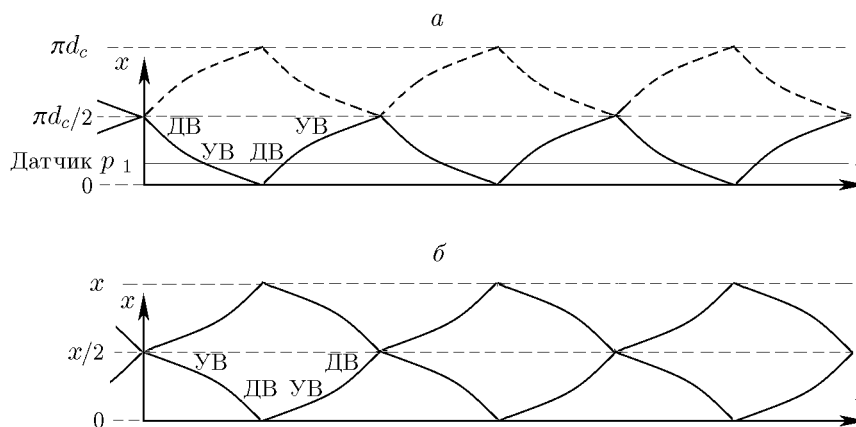


Рис. 9. Фоторегистрограмма процесса (фрагмент) и соответствующие ей осциллограммы высокочастотных колебаний давления в КС (p_{c1}), в форкамере (p_p) и на выходе из КС (p_{c3}) ($g_\delta = 1430$ кг/(с · м²), $\phi = 0.81$, $n = 4$, $\langle D \rangle = 0.81$ км/с, $f = 2.04$ кГц)

Рис. 10. $(x-t)$ -Диаграммы движения поперечных волн:

a — при НМД, b — в классической многофронтной детонации с ячеистой структурой [18]

По структуре волн на фоторегистрограмме и их частоте видно, что в КС развивается режим НМД с $n = 4$. На осциллограммах колебания давления в КС происходят в среднем на уровне $\langle p_{c1} \rangle = 7.1 \cdot 10^5$ Па, в форкамере — $\langle p_p \rangle = 11.1 \cdot 10^5$ Па, на выходе из КС — $\langle p_{c3} \rangle = 4.37 \cdot 10^5$ Па. На осциллограмме давления в КС наблюдаются периодически повторяющиеся две волны разной амплитуды: одна превышает начальное давление перед ней от $p_{c1} \approx 5 \cdot 10^5$ Па до $p_{c1} \approx 12 \cdot 10^5$ Па, а вторая — от $p_{c1} \approx 5 \cdot 10^5$ Па до $p_{c1} \approx (22 \pm 3) \cdot 10^5$ Па. То есть волна с меньшей амплитудой является ударной волной (УВ), а с большей — детонационной волной (ДВ). Поскольку диаметр отверстия датчика имеет конечные размеры — 2.5 мм, то ступеньки во фронте ДВ обусловлены конечным временем прохождения волны от начала до конца датчика (около 3 мкс) и частотой дискретизации сигналов на АЦП (78.125 МГц).

При $n = 4$ волны распространяются в двух секторах, занимающих половину длины окружности КС — $\pi d_c/2$. Для каждой точки волны, движущейся по окружности КС в своем секторе, можно построить $(x-t)$ -диаграмму (рис. 10, a). Для волн, попадающих в поле зрения окна, диаграмма изображена сплошной линией, а во втором секторе, где волны не видны, — штриховой. Датчик p_{c1} фиксирует прохождение волн на расстоянии 110 мм от переднего торца КС. Как и в классической многофронтной детонации [18], сталкивающиеся волны НМД рисуют в плоскости $(x-t)$ «ячейки». Однако существует принципиальная разница в структуре ячеек. Если в классической детонации поперечные волны перед столкновением являются детонационными, распространяющимися по несгоревшему слою смеси за передним детонационным фронтом (рис. 10, b), то в режиме НМД перед столкновением они являются ударными. Это утверждение напрямую следует из осциллограммы давления p_{c1} на рис. 9. УВ проходит через датчик раньше, чем ДВ, и после столкновения с УВ в соседнем секторе в результате повышения давления и температуры формируется расходящаяся ДВ (рис. 10, a). Эта ДВ не является самоподдерживающейся и перед столкновением вырождается в УВ. При столкновении с УВ соседнего сектора вновь рождается ДВ, и процесс повторяется. Причина инверсии столкновений поперечных волн при классической детонации и НМД заключается в последнем случае в отсутствии переднего детонационного фронта. Перед фронтом ДВ не образуется ударно-сжатого слоя свежей смеси. А образующийся в результате смешения слой труднодетонируемой смеси меньше критического для распространения самоподдерживающейся НСД. Свечение продуктов во всем объеме КС (см. рис. 9) указывает на частичное выгорание смеси перед фронтом ДВ. Этим объясняется и низкий уровень давления в ДВ. Итак, в классической

многофронтной детонации передний детонационный фронт поддерживают сталкивающиеся поперечные ДВ, а при НМД — столкновения УВ, превращающихся в результате столкновения в ДВ.

Из осциллограмм давления в форкамере и на выходе из КС следует, что колебания давления незначительны и составляют $p_p = (11.1 \pm 3) \cdot 10^5$ Па и $p_{сз} = (4.37 \pm 1) \cdot 10^5$ Па, т. е. относятся к разряду звуковых колебаний. Причем периодичность колебаний соответствует колебаниям в КС только на выходе из камеры. В форкамере эта периодичность практически незаметна, а имеют место колебания более высокой частоты, обусловленные газодинамикой потока и воздействием детонационных и в меньшей мере ударных волн. Таким образом, ДВ в режиме НМД будут слабо влиять на компрессор и турбину при практическом использовании детонационной КС в турбореактивном двигателе. Возможны дополнительные приспособления для сведения к минимуму их воздействия.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Влияние геометрии КС на режимы НМД

Для режимов НМД гетерогенной смеси керосин — нагретый воздух ($T_p = 800$ К) в базовой КС № 1 без каверны [14] и с каверной (КС № 2, 3, 5) зависимости частоты ПДВ f от удельного расхода воздуха g_δ представлены на рис. 11. Видно, что для богатых по горючему смесей (рис. 11, а) при установке каверны в конце КС (точки 2) частота ПДВ уменьшалась до 1.4 кГц; при установке каверны в начале КС (точки 3) частота ПДВ увеличивалась до 2.7 кГц и расширялись минимальные пределы существования режима НМД с $n = 4$. Для более бедных по горючему смесей (рис. 11, б) при установке каверны в конце КС (точки 2) и начале КС (точки 3) частота ПДВ при $n > 2$ увеличивалась, особенно при размещении каверны в начале КС. При максимальных значениях g_δ наблюдалось до восьми ПДВ (см. табл. 2). Однако эти волны по своей структуре приближаются к акустическим (см. рис. 4), а в КС реализуется обычное горение, поскольку застойные зоны в каверне имеют повышенную температуру и поджигают поступающую смесь. При $n = 2$ во всех КС частота ПДВ близка и находится в пределах $f = 1.2 \pm 0.2$.

В КС № 4 при инициировании первичная ДВ уносилась из КС и наблюдалось ГСП (см. рис. 5, а). Установка каверны в начале камеры (КС № 6) и резкое торможение потока смеси в ней переводили ГСП в ДГ (см. рис. 8). В КС № 5 (см. рис. 7, 9) инициированное

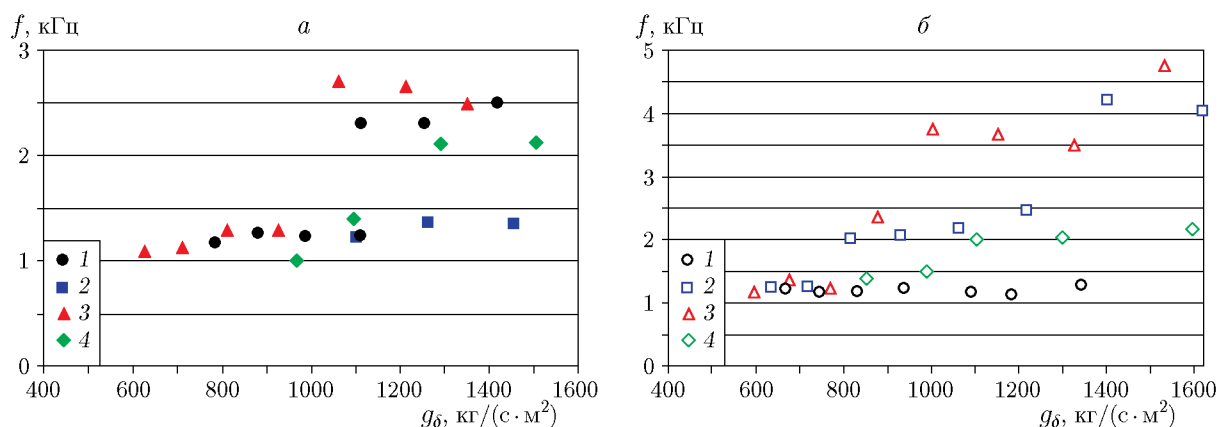


Рис. 11. Зависимости частоты ПДВ от удельного расхода воздуха в богатых (а) и более бедных (б) по горючему смесях для КС № 1 [14] (1), № 2 (2), № 3 (3), № 5 (4)

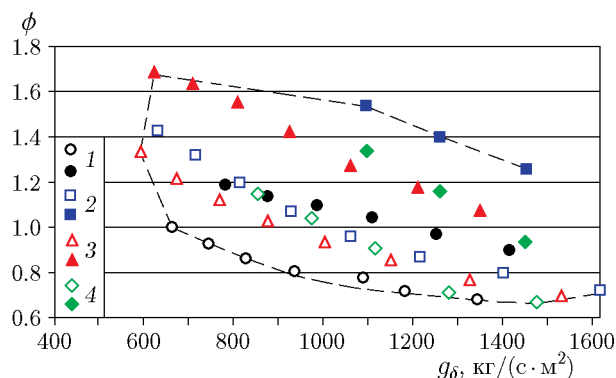


Рис. 12. Область существования НМД в плоскости (ϕ, g_δ) для КС № 1 [14] (1), № 2 (2), № 3 (3), № 5 (4)

ГСП через 10 мс переходило в режим НМД. Минимальные пределы существования ПДВ по g_δ увеличились по сравнению с КС № 1–3, а частота волн практически не изменилась.

Обобщенные данные по области реализации режимов НМД в КС исследованных геометрий в координатах (ϕ, g_δ) для двухфазной смеси керосин — нагретый воздух представлены на рис. 12. Область существования детонационных режимов ограничена штриховой линией. Видно, что с изменением профиля канала КС в результате установки каверн пределы существования режимов НМД в координатах (ϕ, g_δ) значительно расширяются. Минимальный удельный расход воздуха g_δ , при котором реализуется режим НМД, получен в КС № 3 — $g_\delta \approx 600$ кг/(с·м²) при $\phi \approx 1.3$. Примерно это же значение g_δ является граничным в этой КС при $\phi \approx 1.7$. В опытах с уменьшением g_δ увеличиваются значения параметра ϕ , так как расход воздуха в течение эксперимента уменьшается быстрее, чем расход керосина.

3.2. Влияние геометрии КС на удельный импульс

По измеренным средним значениям полного p_{c30} и статического p_{c3} давления на выходе из КС определяли, аналогично [14], силу тяги F_h при истечении продуктов горения, а также силу тяги F_c при холостых пусках. Делением разности сил тяги F_h и F_c на расход керосина G_f и ускорение свободного падения g определяли удельный импульс относительно горючего: $I_{sp,f} = (F_h - F_c)/(G_f \cdot g)$ (в секундах). На рис. 13 представлены зависимости удельного импульса $I_{sp,f}$ от удельного расхода воздуха g_δ . Здесь приведены значения удельных импульсов для обедненных по горючему смесей. Видно, что установка каверны в КС № 2 и 3 уменьшала величину удельного импульса по сравнению с КС № 1. Возможно, снижение удельного импульса связано с образованием высокотемпературных зон в кавернах вследствие торможения потока, что приводило к повышенной диссоциации продуктов в кавернах. При этом температура газа в каверне КС № 2 должна быть больше,

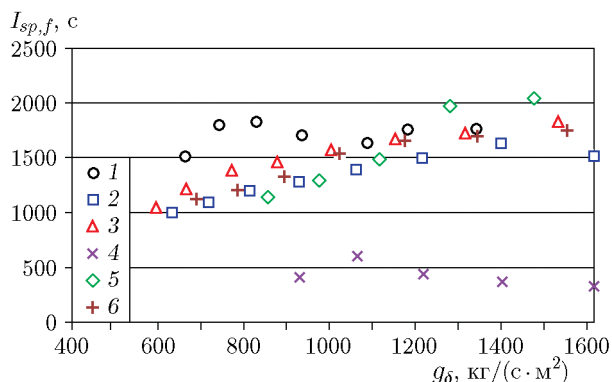


Рис. 13. Зависимости удельного импульса $I_{sp,f}$ от удельного расхода нагретого воздуха g_δ для КС № 1–6 (соответственно зависимости 1–6)

чем в каверне КС № 3, так как к выходу из КС больше полнота сгорания керосина. В итоге можно сделать вывод: установка каверн в исходной камере № 1 ведет к снижению удельного импульса и нежелательна с точки зрения энергетических характеристик. Интересно также отметить, что в работе [13] для гетерогенной смеси керосин — воздух в кольцевой КС (диаметр 500 мм, длина 300 мм) был получен режим НМД с двумя встречными ПДВ, однако удельные импульсы составляли всего ≈ 300 с.

В данном исследовании в КС № 4 не получено детонационное горение керосина с нагретым до 800 К воздухом при $\delta = 10.5$ мм и $\Delta = \Delta_{ex} = 31.5$ мм. Как видно из рис. 5,а и табл. 3, путем нагрева воздуха в КС № 4 был реализован режим ГСП. Согласно данным рис. 12 (кривая 4) значения удельного импульса лежат в диапазоне $I_{sp,f} = 400 \div 600$ с, что явно указывает на неполное сгорание керосина в этой КС. Установка каверны в начале камеры (КС № 6) позволила перевести сгорание керосина из режима ГСП в режим ДГ. Максимальные значения удельного импульса оказались близкими к значениям в КС № 3 — $I_{sp,f,max} \approx 1750$ с, что указывает на одинаковую степень сгорания керосина в КС.

Установкой каверны в конце камеры (КС № 5) был реализован режим НМД, причем с максимальным значением удельного импульса при $g_\delta \approx 1500$ кг/(с·м²) по сравнению с другими схемами КС: $I_{sp,f,max} = 2040$ с. При $g_\delta < 1200$ кг/(с·м²) ПДВ ослабляются и удельный импульс понижается. Таким образом, использование КС по схеме № 5 (с выносом каверны на конец КС) и $g_\delta > 1200$ кг/(с·м²) энергетически более выгодно, чем других исследованных КС.

В КС № 5 каверна располагалась за пределами видимости (в пространстве без окон). Однако по фоторегистрограммам процесса с НМД в течение примерно 10 мс наблюдалось горение керосина в КС в режиме ГСП (см. рис. 5,а), как и в канале постоянного сечения (КС № 4). Затем со стороны каверны в начало КС перемещался скачок уплотнения и формировал режим ДГ (см. рис. 5,б), в котором за время около 6 мс развивались ПДВ. Таким образом, в переходном режиме формирования НМД вихревая зона горения в каверне дожигала смесь, оставшуюся после ГСП, повышала давление на выходе из КС и переводила режим в ДГ, при котором формировались ПДВ.

Необходимо отметить, что при реализации режима НМД в КС № 5 проявилось влияние процесса в КС на систему подачи горючего. Его расход уменьшился на $25 \div 30$ % по сравнению с режимом дозвукового горения в КС № 6. При объемной концентрации воздуха в барботированном керосине $\alpha \approx 0.95$ [9] имеет место сильная зависимость скорости звука в двухфазной среде от величины α [19]. Воздействие ударных волн на поступающую в КС двухфазную смесь вызывает, по-видимому, нестационарные двухскоростные эффекты, снижающие расход керосина. Влияния НМД на расход воздуха не обнаружено.

ВЫВОДЫ

В проточной кольцевой камере сгорания диаметром 503 мм при сужении выходного сечения и профилировании канала (установка каверн в начале или конце КС) в трех КС (№ 2, 3 и 5) из пяти исследованных реализованы режимы НМД керосина с нагретым до 800 К воздухом. По сравнению с КС без каверн повышалась частота поперечных детонационных волн и расширялась область существования НМД по минимальному удельному расходу воздуха до 600 кг/(с·м²) и максимальному коэффициенту избытка горючего до 1.69 в КС № 3. Измерениями высокочастотными датчиками уровней пульсаций давления в форкамере и на выходе из камеры сгорания установлено, что детонационные волны в режиме НМД слабо влияют на компрессор и турбину при практическом использовании детонационной КС в турбореактивных двигателях и энергетических установках. Установлено, что существование НМД обусловлено столкновениями поперечных ударных

волн, порождающих несамоподдерживающиеся поперечные детонационные волны, которые перед столкновениями вырождаются в ударные волны. В режиме НМД максимальный удельный импульс $I_{sp,f,max} = 2040$ с получен в КС № 5 с каверной в конце камеры. Поэтому установка каверны в конце кольцевой цилиндрической камеры энергетически более выгодна, чем в других исследованных КС. В опытах с варьируемой длиной КС № 5 установлено, что минимальная длина камеры сгорания, при которой реализуется режим НМД, находится в пределах $530 \div 670$ мм.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-806 от 29.09.2020).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Быковский Ф. А., Ждан С. А.** Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
2. **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. — EDN: RKZJTF.
3. **Anand V., Gutmark E.** Rotating detonation combustors and their similarities to rocket instabilities // Prog. Energy Combust. Sci. — 2019. — V. 73. — P. 182–234. — DOI:10.1016/j.pecs.2019.04.001.
4. **Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф.** Непрерывное детонационное сжигание топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 3. — С. 120–131. — EDN: VXWGGK.
5. **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. — EDN: NXZVWP.
6. **Kindracki J.** Experimental research on rotating detonation in liquid fuel-gaseous air mixtures // Aerospace Sci. Technol. — 2015. — V. 43. — P. 445–453. — DOI: 10.1016/j.ast.2015.04.006.
7. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация гетерогенной смеси керосин — воздух с добавкой водорода // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 128–130. — DOI: 10.15372/FGV20160318. — EDN: VZYKJF.
8. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная детонация смеси жидкий керосин — воздух с добавкой водорода или синтез-газа // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 5. — С. 83–92. — DOI: 10.15372/FGV20190510. — EDN: FGBMKL.
9. **Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F.** Continuous multifront detonation of kerosene-air mixture in an annular combustor with variations of its geometry // Shock Waves. — 2021. — V. 31, N 8. — P. 829–839. — DOI: 10.1007/s00193-021-01044-4.
10. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л.** Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. — М.: Машиностроение, 2008. — Т. 2.
11. **Wolański P., Balicki W., Perkowski W., Bilar A.** Experimental research of liquid-fueled continuously rotating detonation chamber // Shock Waves. — 2021. — V. 31, N 7. — P. 807–812. — DOI: 10.1007/s00193-021-01014-w.
12. **Фролов С. М., Иванов В. С., Шамшин И. О., Аксенов В. С., Вовк М. Ю., Мокрый И. В., Брусков В. А., Игонькин Д. В., Москвитин С. Н., Илларионов А. А., Марчуков Е. Ю.** Форсажная камера с детонационным горением керосина // Горение и взрыв. — 2022. — Т. 15, № 1. — С. 67–71. — DOI: 10.30826/CE22150108. — EDN: VCWKPI.

13. **Xu S., Song F., Zhou J., Yang X., Cheng P.** Experimental study on propagation characteristics of kerosene/air RDE with different diameters // *Energies*. — 2022. — V. 15, N 12. — 4442. — DOI: 10.3390/en15124442.
14. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная многофронтная детонация смесей керосина с нагретым в форкамере воздухом // *Физика горения и взрыва*. — 2023. — Т. 59, № 5. — С. 103–115. — DOI: 10.15372/FGV2022.9218. — EDN: CIUSJH.
15. **Баев В. К., Головичев В. И., Третьяков П. К., Гаранин А. Ф., Константиновский В. А., Ясаков В. А.** Горение в сверхзвуковом потоке. — Новосибирск: Наука, 1984.
16. **Баев В. К., Москвичёв Д. Ю., Потапкин А. В.** Управление тяговыми характеристиками прямоточной камеры сгорания пульсирующего горения с помощью акустических резонаторов // *Физика горения и взрыва*. — 2000. — Т. 36, № 5. — С. 3–6. — EDN: OPWKTJ.
17. **Meng H., Xiao Q., Feng W., Wu M., Han X., Wang F., Weng C., Zheng Q.** Air-breathing rotating detonation fueled by liquid kerosene in cavity-based annular combustor // *Aerospace Sci. Technol.* — 2022. — V. 122. — 107407. — DOI: 10.1016/j.ast.2022.107407.
18. **Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е.** Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
19. **Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р.** Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. — Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1983.

Поступила в редакцию 18.01.2024.

После доработки 15.03.2024.

Принята к публикации 15.05.2024.
