

УДК 534.2,546.2

НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ СМЕСИ КЕРОСИН — ВОЗДУХ В ПРОТОЧНОЙ ВИХРЕВОЙ РАДИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ ДИАМЕТРОМ 500 ММ

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

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

Реализованы режимы детонационного сжигания авиационного керосина ТС-1 в потоке воздуха в проточной вихревой радиальной камере диаметром 500 мм с истечением к центру. В опытах варьировался диаметр выходного сечения камеры от 250 до 125 мм и форма одной из ее стенок. Расход воздуха в детонационных режимах составлял $5.23 \div 23.85$ кг/с, а керосина — $0.49 \div 1.2$ кг/с. Коэффициент избытка горючего изменялся в пределах $0.58 \div 2.24$. Керосин перед подачей в камеру сгорания барботировался воздухом. Наблюдали пульсирующую детонацию с радиальными волнами и непрерывную спиновую детонацию с одной вращающейся детонационной волной со скоростью, близкой к скорости детонации Чепмена — Жуге. Структура детонационных волн и течение в их окрестности принципиально не отличались от наблюдавшихся ранее в плоскорадиальной камере меньшего диаметра 204 мм. Обнаружено сильное влияние детонационных волн в камере сгорания на систему подачи воздуха и керосина. Центробежные силы, действующие на поток смеси и продукты детонации, увеличивались с уменьшением выходного отверстия камеры сгорания (с увеличением длины камеры). При одинаковых удельных расходах керосиновоздушных смесей наблюдались повышенные давления у цилиндрической поверхности камеры в холостых запусках по сравнению с детонацией.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, вихревая радиальная камера сгорания, авиационный керосин, воздух, структура течения.

DOI 10.15372/FGV20220104

ВВЕДЕНИЕ

Для современной реактивной техники представляет интерес применение детонационного цикла в воздушно-реактивных двигателях. Поэтому в России и за рубежом ведется интенсивное экспериментальное и теоретическое изучение непрерывной спиновой детонации (НСД) по схеме Б. В. Войцеховского в поперечных детонационных волнах (ПДВ) [1]. Обзоры современного состояния экспериментальных исследований НСД в кольцевых камерах сгорания при использовании топливовоздушных смесей приведены в [2–6]. Практический интерес для детонационных двигателей и энергетических установок представляет сжигание в режиме НСД гетерогенных смесей жидкое углеводородное горючее — воздух. Впервые непрерывные спиновые детонационные режимы сжигания топливовоздушных смесей с использованием жидких (керосин, дизельное топ-

ливо) горючих были осуществлены в вихревой проточной камере в плоскорадиальной камере типа жидкостного ракетного двигателя с внешним диаметром $d_{c1} = 204$ мм и истечением продуктов детонации к центру [7]. Подача воздуха в камеру сгорания проводилась через отверстие форсунок малого диаметра с достаточно высоким гидравлическим сопротивлением. В гетерогенной смеси керосин — воздух были получены одноволновые режимы НСД с частотой вращения ПДВ $f = 2.78 \div 3.12$ кГц и скоростью ПДВ относительно наружного диаметра камеры $D = 1.78 \div 2$ км/с.

Основная особенность плоскорадиальных камер сгорания (КС) заключается в том, что они имеют малые продольные размеры, а наружный (d_{c1}) и внутренний (d_{c2}) диаметры намного больше расстояния между стенками — $d_{c1} > d_{c2} \gg \Delta$. При закрутке воздуха в этих камерах развивается течение, в котором в основном вихре образуются более мелкие вихри типа торнадо [8, 9] и происходит более быстрое перемешивание компонентов гетерогенной смеси.

Цель настоящей работы — реализация и

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук № 2.3.1.2.4.

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., 2022.

изучение детонационного горения гетерогенных смесей керосин — воздух в проточной вихревой радиальной КС диаметром 500 мм с истечением продуктов сгорания к центру при варьировании ее геометрии и ширины щели подачи воздуха.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема вихревой радиальной КС диаметром $d_{c1} = 500$ мм с истечением к центру (ПДК-500) приведена на рис. 1.

Экспериментальная камера 1 представляет собой полузамкнутый объем, ограниченный цилиндрической стенкой 2 диаметром $d_{c1} = 500$ мм и двумя боковыми плоскими стенками 3 с расстоянием между ними $\Delta = 15$ мм. Площадь цилиндрической стенки составляла $S_c = \pi d_{c1} \Delta = 235.6$ см², а площадь кольцевого сечения КС линейно уменьшалась вдоль радиуса по направлению к центру и составляла на выходе $S_{ex} = S_c(d_{c2}/d_{c1})$. В ряде опытов одна плоская стенка заменялась конической 4 с углом 7° при основании, что обеспечивало меньшую степень сужения КС на выходе $S_{ex} = \pi d_{c2}(\Delta + \text{tg } 7^\circ(d_{c1} - d_{c2})/2)$. Выхлоп продуктов сгорания из камеры происходил в отверстия 5 на боковой стенке (см. рис. 1) диаметром $d_{c2} = 250, 175$ или 125 мм. При этом изменялись длина КС $L_c = (d_{c2} - d_{c1})/2$, площадь кольцевого сечения на выходе S_{ex} и площадь сечения отверстий $S_{ex}^1 = \pi d_{c2}^2/4$. Коэф-

Таблица 1

Геометрические параметры радиальных КС ($d_{c1} = 500$ мм)

Номер КС	d_{c2} , мм	L_c , мм	K_{ex}
1	250	125	2
2	175	162.5	2.86
3	125	187.5	4
4	250	125	1
5	175	162.5	1.23
6	125	187.5	1.92

фициент сужения на выходе КС определялся по формуле $K_{ex} = S_c/S_{ex, \min}$, где $S_{ex, \min} = \min\{S_{ex}, S_{ex}^1\}$. Конкретные значения геометрических параметров исследованных КС приведены в табл. 1.

Воздух в КС подавали из ресиверов объемом $V_{r,a1} = V_{r,a2} = 85.5$ л (на рис. 1 не показаны) по трубопроводу через коллектор 6 сквозь кольцевую щель 7 шириной $\delta = 1.8$ или 5 мм, площадью $S_\delta = \pi d_{c1} \delta = 28.3$ или 78.5 см² соответственно. Коэффициент расширения КС на входе для $\delta = 1.8$ и 5 мм составлял $K_s = S_c/S_\delta = 8.33$ и 3 . Начальная температура воздуха в ресиверах совпадала с комнатной ($T_{*0} = 293$ К), а за время истечения ($t \approx 0.5$ с) уменьшалась по закону адиабаты до $T_* = 220$ К.

Закрутка воздуха в КС осуществлялась тангенциально направленными каналами внутри коллектора 6. В ряде опытов в трубопроводы воздуха на входе коллектора устанавливались диафрагмы 8 с общей площадью сечений $S_{total} = 27.7$ см². При подаче воздуха из ресивера объемом $V_{r,f} = 13.5$ л (на рис. 1 не показан) и давлении его на поршень расходомера 11 жидкое горючее (авиационный керосин ТС-1) из расходомера через диафрагму 13 вытеснялось в смеситель 14, где смешивалось с воздухом, поступающим из того же ресивера. В результате в коллектор 9, а затем через форсунку 10 в камеру подавалась газокпельная смесь. Форсунка имела 600 отверстий с размерами поперечного сечения 0.6×0.8 мм, равномерно распределенных по цилиндрической стенке под углом 45° к оси КС и попарно направленных встречно под углом 90° (общая площадь отверстий $S_f = 2.88$ см²). Ход поршня L_p расходомера регистрировался реостатным датчиком 12. Для более равномерного распределения кероси-

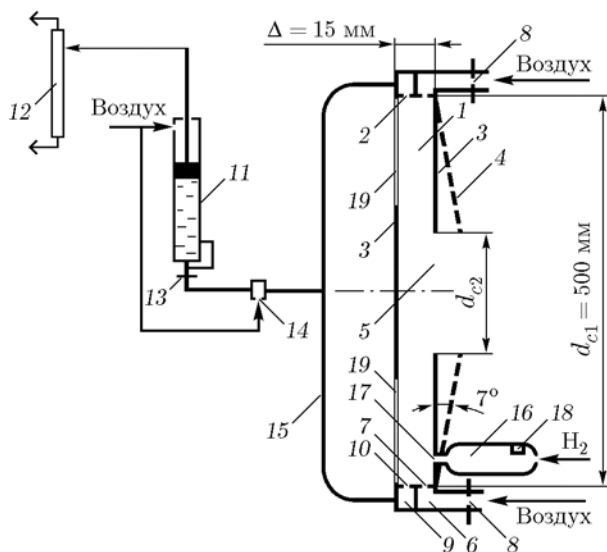


Рис. 1. Схема радиальной камеры сгорания ПДК-500 и системы подачи компонентов смеси

новоздушной смеси по коллектору 9 использовали 24 трубки 15.

Начальное давление в ресиверах воздуха основной подачи устанавливали равным $p_{r,a10} = p_{r,a20} = 60 \cdot 10^5$ Па или $40 \cdot 10^5$ Па, а для вытеснения керосина — $p_{r,f0} = 65 \cdot 10^5$ Па. В опытах, длительность которых лимитировалась временем истечения жидкого керосина (до 0.4 с), расходы воздуха и горючего, определяемые по методике [10], изменялись в диапазонах: основная подача воздуха — $G_a = G_{a1} + G_{a2} = 4.85 \div 35.5$ кг/с; подача воздуха, барботирующего керосин, — $G_{a,f} = 0.38 \div 0.95$ кг/с; подача керосина — $G_f = 0.4 \div 1.96$ кг/с. Массовая доля воздуха в барботируемом керосине $m_{a,f} = G_{a,f} / (G_{a,f} + G_a) = G_{a,f} / G_{a\Sigma}$ составляла $4 \div 7.7$ %. Большие значения $m_{a,f}$ соответствовали меньшим расходам воздуха основной подачи (в конце эксперимента). Поскольку керосин подавался вблизи выхода основного воздуха из щели δ (≈ 1 мм), расход барботирующего воздуха складывался с основным при расчете коэффициента избытка керосина $\phi = (G_f / G_{a\Sigma}) \chi_{f,st} = 0.58 \div 2.14$, где $\chi_{f,st} = G_{a\Sigma} / G_{f,st} = 15.24$ — стехиометрический коэффициент для керосина. Для указанных выше абсолютных расходов воздуха и керосина удельные расходы гетерогенной смеси на входе КС варьировались в диапазоне $g_\Sigma = (G_{a\Sigma} + G_f) / S_c = 223 \div 1590$ кг/(с · м²).

Образующуюся в КС смесь керосина и воздуха инициировали продуктами воспламенения керосиновоздушной смеси в объеме 16 ($V_{in} = 1.5$ л), смесь наполняла объем при повышении давления в КС. Для улучшения воспламенения смеси в объем тонкой струей подавался водород. Объем соединялся с КС отверстием 17 диаметром 12 мм, находящимся на расстоянии 40 мм от цилиндрической поверхности КС. Образующаяся в объеме V_{in} смесь инициировалась пережиганием полоски алюминиевой фольги 18 электрическим током с энергией разряда около 5 Дж. Расход водорода не превышал 1 % от расхода керосина. Его струя с продуктами горения в объеме V_{in} занимала узкую трубку тока в КС, поэтому не влияла на качество установившегося процесса в камере. Порядок подачи компонентов горючей смеси в КС был таков: сначала подавался керосин, а затем воздух с последующим инициированием в объеме 16 смеси, обогащенной водородом. Истечение продуктов осуществлялось в окружающую

среду с давлением $p_a = 10^5$ Па.

Оптическая регистрация процессов проводилась через два радиальных окна 19 шириной 20 мм и длиной 150 мм, расположенных симметрично относительно центра (см. рис. 1), с помощью высокоскоростной камеры Photron Fastcam SA5 в режиме 420 000 кадр/с (время между кадрами $\Delta\tau = 2.38$ мкс). По специальной программе, написанной на языке C++, из каждого кадра, состоящего из 16 пикселей по ширине окна, выбирался только один, который затем соединялся с единичными пикселями других кадров. В результате конструировалась развертка течения в системе волны. В режимах НСД проводилась реконструкция линейной развертки ПДВ в плоскость КС с помощью специально разработанной программы [11].

Давление в ресиверах ($p_{r,a1}$, $p_{r,a2}$ и $p_{r,f}$), коллекторах воздуха ($p_{m,a}$) и горючего ($p_{m,f}$), а также в камере на расстоянии 5 мм (p_{c1} — статическое) и на краю выходного отверстия КС (p_{c3} — статическое, p_{c30} — полное) регистрировалось низкочастотными датчиками давления фирмы «Trafag» (Швейцария) с классом точности 0.5 %. Собственная частота колебаний датчиков составляла 10 кГц. Сигналы с датчиков давления и расхода керосина 12 записывались и обрабатывались компьютерной системой по методикам [10].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В камере ПДК-500 при варьировании длины КС в диапазоне $L_c = 125 \div 187.5$ мм, ее формы, а также размеров щели подачи воздуха ($\delta = 1.8$ и 5 мм) в области указанных выше параметров подачи компонентов гетерогенной смеси керосин — воздух ($G_{a\Sigma}$, G_f) были исследованы возможности реализации режимов НСД.

2.1. КС с плоскими стенками и щелью подачи воздуха $\delta = 1.8$ мм

Первая серия опытов проведена при установке щели подачи воздуха $\delta = 1.8$ мм на входе в КС ($K_s = 8.33$). Начальное давление в ресиверах воздуха основной подачи устанавливали равным $p_{r,a10} = p_{r,a20} = 60 \cdot 10^5$ Па. В камерах № 1 ($L_c = 125$ мм) и № 2 ($L_c = 162.5$ мм) не удалось возбудить горение. При инициировании пламя от инициирующей струи из отверстия 17 (см. рис. 1) выбрасывалось за пределы

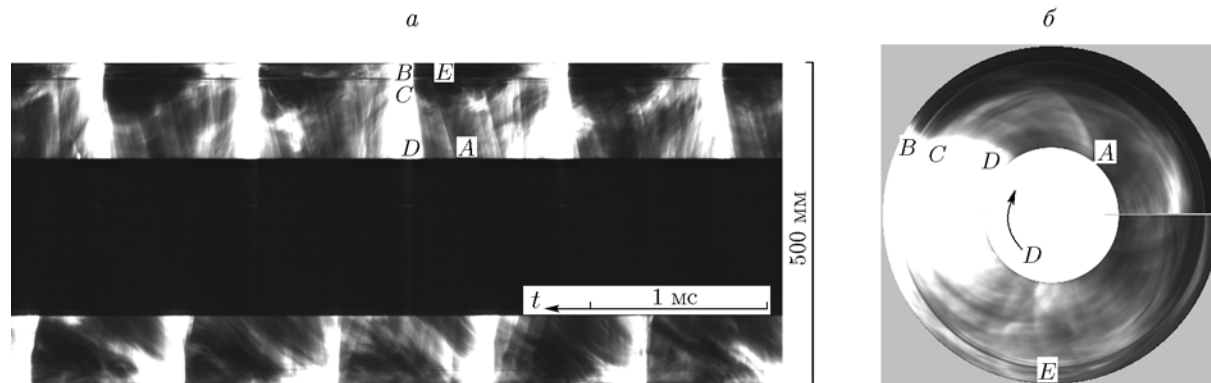


Рис. 2. Фоторегистрограмма (фрагмент) НСД в КС № 3 ($K_{ex} = 4$) при $\delta = 1.8$ мм ($G_{a\Sigma} = 12.8$ кг/с, $\phi = 1.26$, $D = 1.8$ км/с ($f = 1.14$ кГц))

КС с началом поступления воздуха. И лишь в КС № 3 ($L_c = 187.5$ мм) с выходным отверстием $d_{c2} = 125$ мм ($K_{ex} = 4$) в диапазоне расходов воздуха $G_{a\Sigma} = 17.2 \rightarrow 10.62$ кг/с ($\phi = 0.79 \rightarrow 1.56$) был реализован стабильный режим НСД с одной ПДВ, вращающейся со скоростью $D = 1.83 \rightarrow 1.63$ км/с относительно наружного диаметра камеры (стрелками показано изменение параметров в течение эксперимента). На рис. 2 приведены фрагмент типичной фоторегистрограммы НСД (рис. 2,а) и реконструкция линейной развертки ПДВ в плоскости КС (рис. 2,б).

Фоторегистрация через два окна позволяла однозначно определять: а) направление вращения волн, так как в одном окне происходит компенсация скорости, а в другом — ее полная раскомпенсация; б) четность или нечетность количества волн. В верхнем окне (рис. 2,а) волны движутся слева направо, а в нижнем — в обратном направлении. Из рис. 2,а определялось время появления фронта ПДВ BC против окна $\Delta t = 0.877$ мс, которое позволяло однозначно находить их частоту $f = 1/\Delta t = 1.14$ кГц. При известном числе волн n , располагающихся по периметру КС, по частоте f согласно формуле [10] $Dn = \pi d_{c1}/\Delta t$ определяется скорость ПДВ D относительно наружного диаметра камеры. Поскольку на фоторегистрограмме рис. 2,а фронты ПДВ в верхнем и нижнем окнах располагаются не напротив друг друга, то число ПДВ n — нечетное. В данном случае могут быть одна ($n = 1$) или три волны ($n = 3$). Подстановка $n = 3$ в формулу для скорости D дает значение скорости $D = 0.6$ км/с, которая не соответствует детонационной. Следовательно, однозначно определяем, что на фоторегистрограмме НСД (см. рис. 2,а) изобра-

жен одноволновый процесс НСД со скоростью ПДВ относительно наружного диаметра камеры $D = 1.8$ км/с. Покадровый просмотр процесса на входе в КС показывает направление движения закрученного потока исходной гетерогенной смеси. В данном случае ПДВ распространяется в направлении движения смеси.

На рис. 2,а наблюдается регулярная структура ПДВ с явно выраженными фронтами и течениями в их окрестности. Здесь BC — поперечный фронт детонационной волны, BA — косая ударная волна («предвестник»). Видно множество косых ударных волн E , тормозящих сверхзвуковой поток продуктов за и перед фронтом ПДВ BC . Эти косые волны поворачивают поток в обратную сторону (в сторону цилиндрической поверхности). Подобная картина волн наблюдалась в плоскорадиальной камере диаметром 204 мм при $K_{ex} = 4$ [7]. Отметим, что более узкая развертка ПДВ в нижнем окне рис. 2,а обусловлена его частичным перекрытием в верхней части во время опыта непрозрачным предметом.

На рис. 2,б приведена реконструкция линейной развертки (см. рис. 2,а) детонационной волны BCD и течения в ее окрестности в плоскости камеры. Ширина фронта BC составляет $1/2 \div 1/3$ части окна ($h \approx 75 \div 50$ мм). Параметры НСД приведены в табл. 2 (первая строка). ПДВ всегда двигались в направлении движения потока. На рис. 3 представлены зарегистрированные в этом опыте осциллограммы давлений в системе подачи (рис. 3,а) и в КС (рис. 3,б), показан момент инициирования I_n а также ход поршня расходомера керосина L_p (рис. 3,а).

При $t = 0.175$ с открывается клапан воз-

Таблица 2

Параметры НСД в КС № 3 ($K_{ex} = 4$) и № 6 ($K_{ex} = 1.92$) с $\delta = 1.8$ мм

Номер КС	$p_{m,a}/p_a$	g_{Σ} , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	D , км/с	p_{c1}/p_a	p_{c3}/p_a	Режим
3	50 → 44	1 021 → 989	0.62	—	—	—	40 → 32	37 → 30	Зарождение НСД
	47 → 30	806 → 497	0.79 → 1.56	1.16 → 1.03	1	1.83 → 1.63	32 → 12.5	30 → 12	НСД
6	47.5 → 38	1 022 → 872	0.48 → 0.74	—	—	—	35 → 28	30 → 25	Зарождение НСД
	41 → 19	470 → 255	1.31 → 2.24	1.24 → 0.79	1	1.96 → 1.25	17.5 → 6.3	19 → 7	НСД

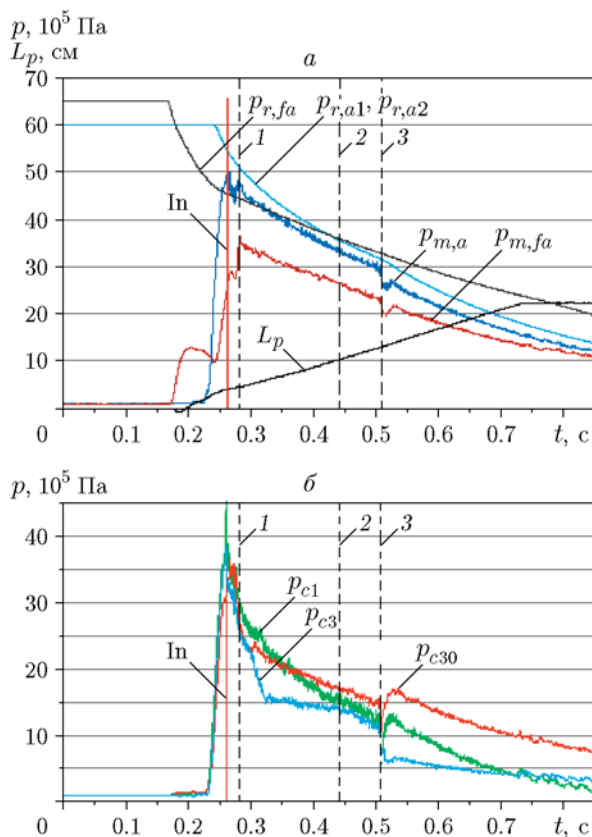


Рис. 3. Осциллограммы давлений в системе подачи (а) и в КС № 3 ($K_{ex} = 4$) (б):

L_p — ход поршня расходомера, In — момент инициирования, 1–3 — время существования НСД, 2 — параметры НСД в момент времени, соответствующие ПДВ на рис. 2

духа, который поступает в смеситель и создает давление на поршень расходомера. Мембрана прорывается, и барботированный воздухом керосин поступает в коллектор и в КС, поднимая давление до $p_{m,f} = 12.5 \cdot 10^5$ Па и $p_{c1} \approx 1.2 \cdot 10^5$ Па соответственно. При $t = 0.25$ с от-

крываются клапаны системы подачи основного воздуха в КС, давление в коллекторе воздуха повышается до $p_{m,a} = 50 \cdot 10^5$ Па, а в камере — до $p_{c1} \approx 40 \cdot 10^5$ Па. Под воздействием давления в КС поднимается давление в коллекторе керосина до $p_{m,f} = 29 \cdot 10^5$ Па и затормаживается движение поршня расходомера. При этом почти вдвое (до $G_f = 0.95$ кг/с) снижается расход керосина. Образуемая в КС смесь керосин — воздух наполняет баллон для инициирования, в который одновременно начинает поступать тонкой струей водород. Момент инициирования ($t \approx 0.26$ с) совмещен с подъемом давления в КС и наполнением смеси в баллоне. После инициирования продукты горения поступают в КС и вызывают в ней неустойчивое горение, переходящее через 16 мс в режим НСД. При этом повышаются давления в коллекторах керосина и воздуха, снижающие расходы основного воздуха и керосина, а в КС, напротив, давления резко снижаются. Причем давление в начале камеры p_{c1} , будучи больше полного давления на выходе из камеры p_{c30} , при развитии НСД становится меньше p_{c30} . Устойчивый режим НСД продлился около 0.25 с и резко прекратился. Начало и конец режима НСД отмечены изломами кривых давления в ресиверах основной подачи воздуха и кривой хода поршня расходомера: до НСД и после нее эти кривые имеют больший наклон к оси времени. Поскольку расход воздуха к концу опыта убывал быстрее, чем расход керосина, коэффициент избытка горючего повышался. Отметим, что в табл. 2 приведены также параметры процесса в начале опыта до развития и формирования ПДВ. Из рис. 2 видно, что угол наклона траекторий движущихся продуктов на выходе из КС сильно меняется за период вращения ПДВ, поэтому зафиксированные неподвижными дат-

чиками полные давления лишь приблизительно отображают динамику давления в КС. Этим объясняется и незначительное отличие статического давления p_{c3} от полного давления p_{c30} .

2.2. КС с плоской и конической стенками и щелью подачи воздуха $\delta = 1.8$ мм

В опытах с КС № 4–6 с плоской и конической стенками (см. табл. 1) воздух подавался через щель $\delta = 1.8$ мм. Установка одной конической стенки под углом 7° к плоскости камеры (см. рис. 1) позволяла увеличивать площадь ее кольцевого сечения перед выходным отверстием КС одной и той же длины L_c . Начальное давление в ресиверах воздуха основной подачи устанавливали равным $p_{r,a10} = p_{r,a20} = 60 \cdot 10^5$ Па.

В КС № 4 ($K_{ex} = 1$) длиной $L_c = 125$ мм и в КС № 5 ($K_{ex} = 1.23$) длиной $L_c = 162.5$ мм не удалось возбудить детонационное сжигание в камере. Пламя от инициирующего устройства выбрасывалось за ее пределы. В КС № 6 ($K_{ex} = 1.92$) длиной $L_c = 187.5$ мм после инициирования в диапазоне расходов воздуха $G_{a\Sigma} = 23.35 \rightarrow 19.6$ кг/с ($\phi = 0.48 \rightarrow 0.74$) наблюдался неустойчивый режим горения с зарождением и угасанием ПДВ. Эту часть процесса также необходимо отнести к его переходной части, не означающей, что при больших расходах воздуха и керосина НСД невозможна.

В диапазоне расходов воздуха $G_{a\Sigma} = 10.23 \rightarrow 5.5$ кг/с ($\phi = 1.31 \rightarrow 2.24$) был реализован устойчивый режим НСД, в котором ПДВ вращались со скоростью $D = 1.96 \rightarrow 1.25$ км/с (частота $f = 1.24 \rightarrow 0.79$ кГц) относительно цилиндрической поверхности камеры. Фраг-

мент фоторегистрограммы (а) и реконструкция ПДВ в плоскости камеры (б) представлены на рис. 4. Видно, что поток продуктов так же, как на рис. 2, тормозится в скачках уплотнения и после предвестника АВ поворачивает в обратную сторону от выхода КС. При этом высота h детонационного фронта ВС составляет примерно половину длины окна — $h \approx 75$ мм. Параметры процесса приведены в табл. 2 (вторая строка).

На рис. 5 представлены осциллограммы давлений в системе подачи (рис. 5,а) и в КС (рис. 5,б) из этого опыта, показан момент инициирования I_n , а также ход поршня расхода керосина L_p (рис. 5,а). Порядок следования подачи компонентов гетерогенной смеси, ее инициирования, переходного режима от инициирования до детонации, НСД и ее затухания аналогичен порядку в опыте в КС № 3 (см. рис. 3). Различие лишь в длительности этих периодов и параметров процесса (см. также табл. 2). После инициирования продукты горения поступают в КС № 6 и в течение 68 мс вызывают в ней неустойчивое горение с нерегулярными поперечными волнами, переходящими в режим НСД. При этом повышаются давления в коллекторах керосина и воздуха, расход основного воздуха снижается почти в два раза, а расход керосина — незначительно. Давления в КС резко падают. Причем давление в начале камеры p_{c1} , будучи больше статического давления на выходе из камеры p_{c3} , при развитии НСД становится меньше p_{c3} . Устойчивый режим НСД продлился около 0.4 с и резко прекратился, сменившись отдельными вспышками по мере подачи керосина. В конце опыта подача керосина прекратилась и в КС втекал холод-

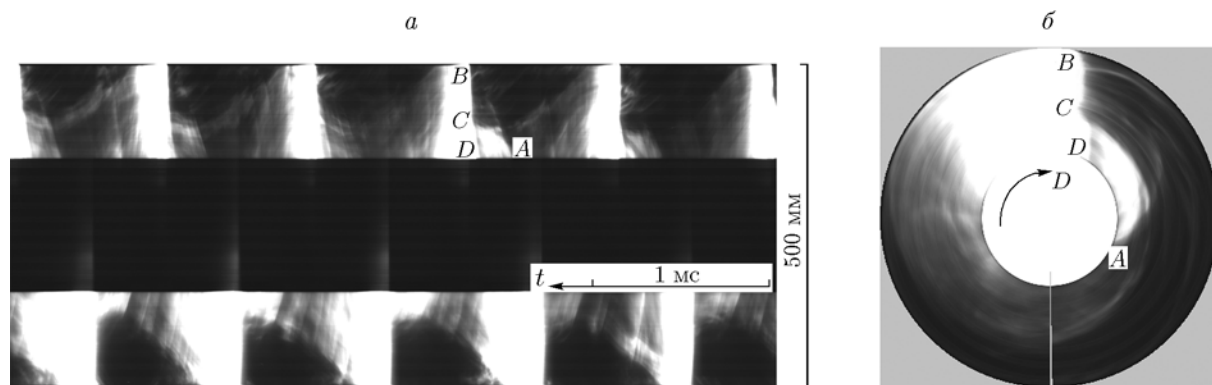


Рис. 4. Фоторегистрограмма (фрагмент) ПДВ в КС № 6 ($K_{ex} = 1.92$) при $\delta = 1.8$ мм ($G_{a\Sigma} = 6.4$ кг/с, $\phi = 1.79$, $D = 1.83$ км/с ($f = 1.16$ кГц))

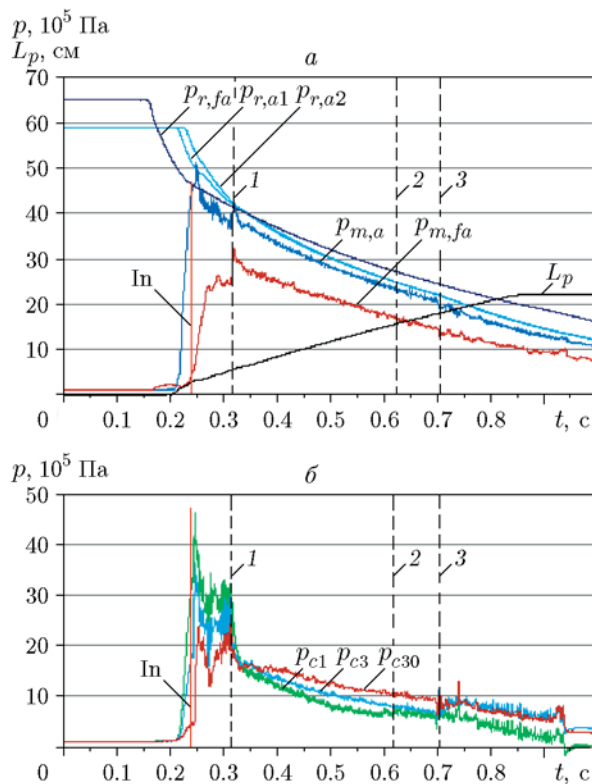


Рис. 5. Осциллограммы давлений в системе подачи (а) и в КС № 6 ($K_{ex} = 1.92$) (б):

L_p — ход поршня расходомера, In — момент инициирования, 1–3 — время существования НСД, 2 — параметры НСД в момент времени, соответствующие ПДВ на рис. 4

ный воздух. Отметим, что переходный процесс от инициирования до НСД, а также сам процесс НСД более длительны, чем в КС № 3. Пока недостаточно экспериментальных данных для объяснения этого факта.

2.3. КС с плоскими стенками и щелью подачи воздуха $\delta = 5$ мм

В целях снижения полного давления на щели подачи воздуха опыты проведены при установке ширины щели $\delta = 5$ мм ($K_s = 3$) и на-

чальном давлении в ресиверах воздуха основной подачи $p_{r,a10} = p_{r,a20} = 40 \cdot 10^5$ Па. Меньшие давления подачи выбраны для выравнивания расходов воздуха с предыдущими экспериментами в КС с $\delta = 1.8$ мм ($K_s = 8.33$). В камерах № 1 и 2 не удалось возбудить горение. При инициировании пламя от инициирующей струи из отверстия 17 (см. рис. 1) выбрасывалось за пределы КС с началом поступления воздуха. То же самое наблюдали и при достаточно высоком расходе воздуха $G_{a\Sigma} = 35.5 \rightarrow 8.83$ кг/с ($\phi = 0.84 \rightarrow 2$) при давлении его подачи от $p_{r,a10} = p_{r,a20} = 60 \cdot 10^5$ Па. Только в КС № 3 длиной $L_c = 187.5$ мм удалось наблюдать пламя, а после инициирования в диапазоне расходов воздуха $G_{a\Sigma} = 17.7 \rightarrow 8.5$ кг/с ($\phi = 0.9 \rightarrow 2.0$) в ней развивалась пульсирующая детонация с радиальными волнами низкой частоты $f = 180 \rightarrow 160$ Гц (рис. 6). Здесь AB — фронт падающей волны, формирующейся со стороны выходного отверстия КС, CD — размытая граница продуктов и натекающей свежей смеси, темная полоса (шириной 200 мм) — непрозрачная область между окнами. Параметры процесса приведены в табл. 3 (первая строка).

Для определения влияния площади сечения трубопроводов S_{total} на протекание процесса в КС № 3 были проведены опыты при сужении трубопроводов воздуха на входе в камеру в два раза за счет установки диафрагм 8 общей площадью $S_{total} = 27.7$ см² (см. рис. 1). Чтобы расходы воздуха были близки к расходам предыдущего опыта, начальное давление воздуха в ресиверах было увеличено в 1.5 раза: от $p_{r,a10} = p_{r,a20} = 40 \cdot 10^5$ Па до $60 \cdot 10^5$ Па. В диапазоне расходов воздуха $G_{a\Sigma} = 20.3 \rightarrow 16.3$ кг/с ($\phi = 0.58 \rightarrow 0.99$) наблюдали режим НСД с одной ПДВ нерегулярной структуры, вращающейся с низкой скоростью $D = 1.22 \rightarrow 1.08$ км/с относительно наружного диаметра камеры. На рис. 7 приведены типичный фрагмент фоторегиограммы НСД (рис. 7,а) и реконструкция линейной развертки ПДВ в плоскости КС

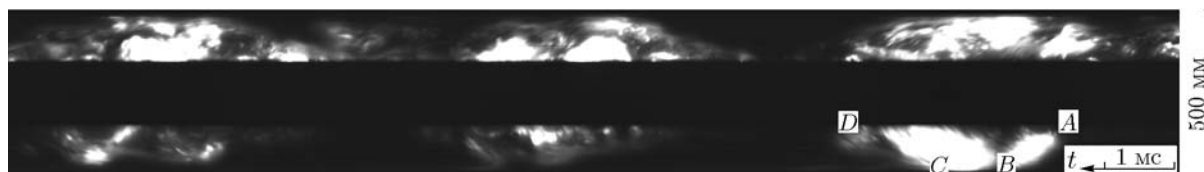


Рис. 6. Пульсирующая детонация в ПДК-500 (КС № 3, $K_s = 3$), зафиксированная через два окна камеры ($G_{a\Sigma} = 16.2$ кг/с, $\phi \approx 1$, $f = 0.17$ кГц)

Таблица 3

Параметры режимов горения в КС № 3 ($K_{ex} = 4$) с $\delta = 5$ мм

$S_{total},$ см ²	$p_{m,a}/p_a$	$g_{\Sigma},$ кг/(с·м ²)	ϕ	$f,$ кГц	n	$D,$ км/с	p_{c1}/p_a	p_{c3}/p_a	Режим
59	32 → 28	795.6 → 729	0.9 → 0.93	—	—	—	27.5 → 24.5	13.8 → 12.6	Неустойчивое горение
	29 → 15	729 → 408	0.93 → 2.0	0.18 → 0.16	—	—	25 → 12.5	17 → 6	ПД
28	43 → 40.5	910 → 894	0.58	—	—	—	38	28	Неустойчивое горение
	42.5 → 33	894 → 737	0.58 → 0.99	0.77 → 0.7	1	1.22 → 1.08	38 → 27	27 → 19	НСД
	33 → 14	738 → 403	0.99 → 2.08	0.23 → 0.16	—	—	27 → 12	19 → 8	ПД

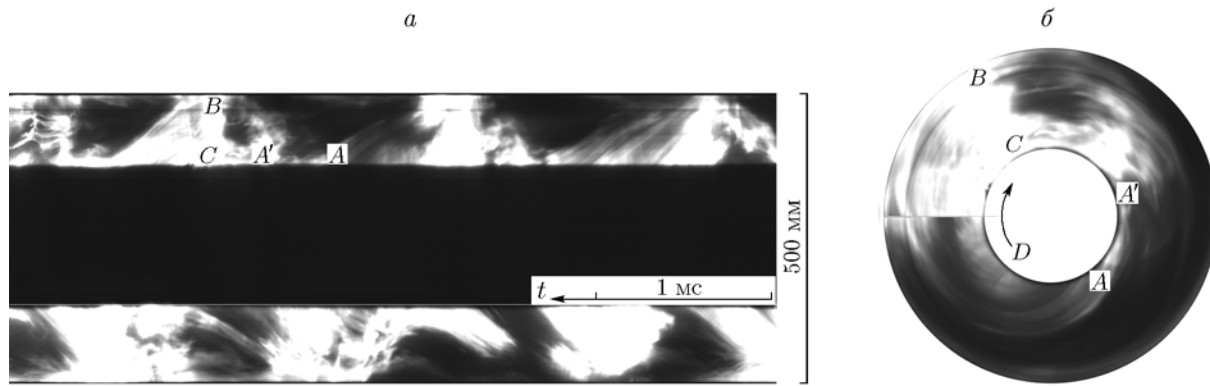


Рис. 7. НСД смеси керосин — воздух в КС № 3 при $S_{total} = 27.7$ см² ($G_{a\Sigma} = 20$ кг/с, $\phi \approx 0.6$, $D = 1.22$ км/с ($f = 0.77$ кГц))

(рис. 7,б). Здесь BC — поперечный фронт детонационной волны, BA — косая ударная волна («предвестник»), BA' — серия косых ударных волн, распространяющихся впереди фронта BC и догоняющих предвестник BA . За одной из них (BA') происходит частичное воспламенение смеси. Фронт BC занимает почти всю ширину окна — $h \approx 150$ мм. Увеличение фронта ПДВ по сравнению с рис. 2 связано, по-видимому, с худшим перемешиванием компонентов, с большим влиянием процесса в камере на систему подачи и с пониженной скоростью ПДВ. Видно, что косые волны тормозят поток продуктов и перед фронтом BC поворачивают его обратно. В верхнем окне волны движутся слева направо, а в нижнем — в обратном направлении. На рис. 7,б приведена реконструкция линейной развертки детонационной волны BCD и течения в ее окрестности в плоскости камеры. В диапазоне расходов $G_{a\Sigma} = 16.3 \rightarrow 7.8$ кг/с ($\phi \approx 0.99 \rightarrow 2.08$) ПДВ выродились в радиальные и нерегулярные пульсирующие

волны, аналогичные представленным на рис. 6. Параметры процесса приведены в табл. 3 (вторая строка).

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Влияние геометрии КС и системы подачи воздуха на режим детонации

Описанные выше опыты в камерах ПДК-500 (см. табл. 1) для смеси керосин — воздух показывают (см. табл. 2), что при ширине щели подачи воздуха $\delta = 1.8$ мм и длине камеры $L_c = 187.5$ мм в КС № 3 ($K_{ex} = 4$) и КС № 6 ($K_{ex} = 1.92$) в широкой области расходов смеси реализуются режимы НСД со скоростями ПДВ, близкими к скоростям детонации Чепмена — Жуге [12]. Обобщающие зависимости скорости ПДВ D от удельного расхода гетерогенной смеси керосин — воздух g_{Σ} и коэффициента избытка горючего ϕ представлены на рис. 8.

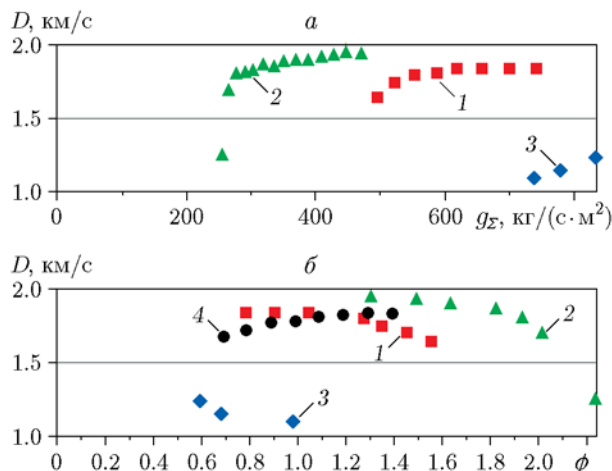


Рис. 8. Зависимости скорости ПДВ смеси керосин — воздух от удельного расхода (а) и коэффициента избытка горючего ϕ (б) в камере сгорания ПДК-500 трех геометрий:

1 — КС № 3 ($\delta = 1.8$ мм), 2 — КС № 6 ($\delta = 1.8$ мм), 3 — КС № 3 ($\delta = 5$ мм, $S_{total} = 27.7$ см²), 4 — D_{CJ} [12]

Скорости ПДВ D уменьшаются со снижением удельного расхода смеси g_{Σ} (рис. 8,а) и увеличением коэффициента избытка горючего ϕ (рис. 8,б) (см. также табл. 2 и 3). Сравнение экспериментальных значений скорости НСД D для гетерогенной смеси керосин — воздух в камере ПДК-500 (рис. 8,б) со скоростью детонации Чепмена — Жуге (D_{CJ}) [12] показывает, что в режиме НСД могут реализовываться детонационные волны, скорость которых на 7 ÷ 8 % превышает D_{CJ} . Этот эффект объясняется тем, что вихревой поток смеси, поступающий в КС, имеет перед фронтом ПДВ ненулевую тангенциальную компоненту скорости, а ПДВ распространяется в направлении движения смеси.

Если реконструировать ПДВ и течения в ее окрестности по первому и последнему пикселям рамки кадра, а затем сравнивать одинаковые точки этих реконструкций, то за время $t = N\Delta\tau$ (N — количество пикселей между одноименными точками) при ширине части окна b , охватываемого рамкой кадра, можно с точностью $\pm\Delta\tau/(t + |\Delta\tau|)$ определить скорость этих точек в тангенциальном и радиальном направлениях, в том числе и на фронте ПДВ: $v = b/t$. Знак этой скорости, определяемый направлением оси времени протекания процесса, определяет и направление движения точек в потоке. Поскольку скорость ПДВ намного боль-

ше тангенциальной скорости движения смеси ($D \gg v_{mt} \approx 200$ м/с), на фоторегистрограмме, реконструированной в системе волны, смесь и продукты реакции движутся навстречу волне.

По перемещению светящихся частиц в области смесеобразования, движущихся против окна, была определена тангенциальная составляющая скорости смеси перед фронтом ПДВ, которая равна $200 \div 270$ м/с, а в среднем — $v_{mt} = 230$ м/с. Эта скорость соответствует максимальной тангенциальной составляющей скорости потока холодного воздуха в переходном режиме при заполнении им плоскорадиальной КС диаметром $d_{c1} = 204$ мм [8]. Поэтому относительно потока смеси будем иметь скорость ПДВ $(D - v_{mt})/D_{CJ} = 0.95 \div 0.78$, причем последнее значение соответствует порогу затухания ПДВ. К центру КС скорость фронта ПДВ будет уменьшаться пропорционально радиусу камеры на 20 ÷ 30 %.

Обращает на себя внимание сдвиг зависимостей влево и вверх с уменьшением удельного расхода смеси (см. рис. 8,а) и вправо и вверх с увеличением коэффициента избытка горючего ϕ (см. рис. 8,б) в последовательности 3 — 1 — 2. Причем начальные расходы компонентов смеси для всех КС были близки — $G_{\Sigma 0} \approx 20$ кг/с. Сдвиг зависимостей объясняется различным временем формирования НСД от начала инициирования, а также степенью воздействия ПДВ на систему подачи: чем слабее ПДВ, тем меньше ее воздействие на систему подачи воздуха и керосина. В свою очередь, время формирования НСД зависит от коэффициента избытка горючего ϕ во время переходного процесса: чем ближе величина ϕ к пределам по детонации, тем длительнее формирование НСД.

Наиболее длительный период формирования НСД после инициирования (через 95 мс) происходил в КС № 3 с $\delta = 5$ мм (кривая 3 на рис. 8) при большом удельном расходе смеси и малом коэффициенте избытка горючего ($\phi = 0.6$). В той же КС № 3 при $\delta = 1.8$ мм (кривая 1) задержка составила 16 мс ($\phi = 0.62$), а в КС № 6 (кривая 2) — 68 мс ($\phi = 0.48 \rightarrow 0.74$). Появление слабых ПДВ в КС № 3 ($\delta = 5$ мм, кривая 3) практически не повлияло на расход компонентов смеси, однако на ее формирование потребовалось больше времени из-за неустойчивости подачи воздуха через широкую кольцевую щель. При установке щели шириной $\delta = 1.8$ мм подача воздуха в КС стабилизиро-

валась, и при близком коэффициенте избытка горючего ($\phi = 0.62$) время переходного процесса уменьшилось с образованием сильных ПДВ. В КС № 6 скорости детонации выше, поэтому их влияние на систему подачи более значительное, поскольку давление во фронте волны пропорционально квадрату скорости ($p_w \sim D^2$). Кроме того, формирование ПДВ происходило в смеси с меньшим коэффициентом избытка горючего — $\phi = 0.48 \rightarrow 0.74$. Поэтому процесс формирования ПДВ в КС № 6 был достаточно длительным. А когда ПДВ сформировались, их влияние сразу же снизило расход смеси почти вдвое и кривая $D(g_\Sigma)$ сдвинулась в область более низких расходов смеси, а кривая $D(\phi)$ — в область более высоких коэффициентов избытка горючего (с $\phi = 0.74$ до $\phi = 1.31$). Процесс в КС № 3 ($\delta = 1.8$ мм, кривая 1) занимает промежуточное положение по скорости ПДВ. В момент формирования ПДВ их воздействие на систему подачи менее значительно, чем в КС № 6, и расход воздуха снижается лишь в 1.3 раза, а керосина — в 1.1 раза.

Возникает вопрос, можно ли считать наблюдаемые ПДВ стационарными. Под стационарностью детонации подразумевается регулярная структура волны и течения в ее окрестности, а также постоянство скорости волны. В данном случае структура волны и течение в ее окрестности нерегулярны из-за наличия нестационарных скачков уплотнения, вызванных торможением сверхзвукового потока за фронтом детонационной волны. Однако скорость волны практически постоянна (стационарна), так как отклонение скорости ПДВ от средней величины за пять периодов составляет: на рис. 2 — $\pm 0.27\%$, а на рис. 4 — $\pm 1.1\%$. Структура течения от ресиверов воздуха до КС не видна, однако постоянство скорости волн указывает на то, что в системе подачи формируется течение, обеспечивающее в исходной смеси перед волной постоянные начальные условия. И это несмотря на то, что во фронте волны давление составляет несколько сотен атмосфер и ударные волны заходят в систему подачи вплоть до ресиверов.

Особенностью режимов НСД в рассмотренных камерах является резкое прекращение детонации при определенном расходе смеси. Одна из наиболее вероятных причин — препятствование продуктами детонации, отклоняемыми в сторону цилиндрической поверхности косыми скачками уплотнения, формированию де-

тонационноспособного слоя смеси перед ПДВ, который увеличивается с уменьшением давления в камере. В КС № 6 косые скачки менее выражены, поэтому ПДВ существуют при меньших расходах смеси.

В КС № 3 при $K_{ex} = 4$ и $\delta = 5$ мм ($S_\delta = 78.5$ см²) возможна пульсирующая детонация, когда площади наименьшего сечения трубопроводов воздуха в системе подачи и на выходе из камеры сгорания равны: $S_{total} \approx S_{ex} \approx 59$ см². КС работает в автоколебательном режиме эжекции: за отраженной от цилиндрической поверхности радиальной детонационной волной возникает волна разрежения, в результате действия которой из системы подачи всасывается воздух. Волна детонации, зарождающаяся за пределами камеры, вновь входит в КС, и процесс периодически повторяется. Режим с продольными радиальными волнами реализуется и в КС № 3 ($\delta = 5$ мм) при сужении входного сечения трубопровода в два раза — до $S_{total} = 27.7$ см², причем в узком диапазоне расходов смеси в КС возможны режимы НСД (см. рис. 7) со скоростями ПДВ, приведенными на рис. 8 (кривая 3). Не исключено существование режима НСД и при больших удельных расходах смеси, которые не достигались на данной установке.

3.2. Влияние центробежных сил на поток смеси и продукты детонации

Был обнаружен интересный факт, который не наблюдался в камерах кольцевой цилиндрической геометрии и в вихревых плоскорадиальных камерах с истечением к центру [7]. При близких начальных расходах воздуха ($G_{a\Sigma 0} \approx 20$ кг/с) в рассмотренных опытах давление в ПДК-500, в том числе и в ее начале (p_{c1}), с пережатыми трубопроводами воздуха ($S_{total} = 27.7$ см²) почти в 1.5 раза больше, чем без пережатия ($S_{total} = 59$ см²) (рис. 9). Истечение воздуха из ресиверов в КС было докритическим — $p_{r,a1} \approx p_{r,a2} < 1.8p_{c1}$.

Объяснение можно найти только в наличии центробежных сил, действующих на поступающую в КС свежую смесь и продукты реакции. При $G_a = \rho v S_\delta = \text{const}$ и постоянной площади проходного сечения щели воздуха S_δ произведение плотности и скорости ρv постоянно. Поскольку давление от центробежных сил описывается формулой $p = \rho v^2 / r$ (r — радиус элементарного объема), то снижение (увели-

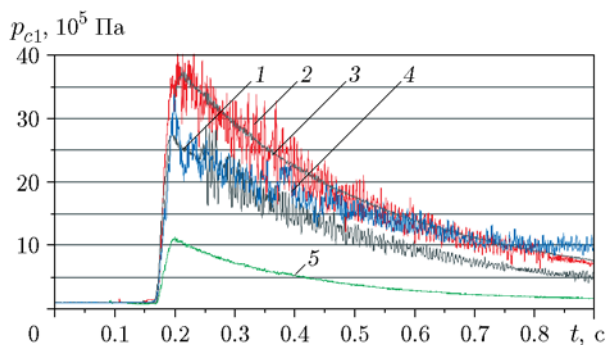


Рис. 9. Осциллограммы средних статических давлений p_{c1} в КС с плоскими стенками при близких начальных расходах воздуха $G_{a\Sigma 0} \approx 20$ кг/с:

1–3 — $\delta = 5$ мм, $K_{ex} = 4$: 1 — $S_{total} = 59$ см², 2 и 3 — $S_{total} = 27.7$ см²; 4 — $\delta = 1.8$ мм, $K_{ex} = 4$; 5 — $\delta = 5$ мм, $K_{ex} = 2$

чение) плотности и увеличение (уменьшение) скорости на одинаковую относительную величину по-разному будут влиять на центробежные силы, так как они будут изменяться линейно от величины плотности и квадратично от скорости. В опытах без диафрагмы 8 ($S_{total} = 59$ см²) и при начальном давлении подачи воздуха из ресиверов $p_{r,a10} = p_{r,a20} \approx 40 \cdot 10^5$ Па разность давлений $\Delta p = p_{r,a} - p_{c1}$ меньше, чем в опытах с диафрагмой и начальным давлением $p_{r,a10} = p_{r,a20} \approx 60 \cdot 10^5$ Па. В условиях докритического истечения воздуха это приводит к увеличению скорости воздуха и в результате к увеличению давления в КС. При установке на входе в камеру щели подачи воздуха $\delta = 1.8$ мм давление в КС (кривая 4) занимало промежуточное положение между кривыми 1–3 (см. рис. 9). Осциллограмма давления 1 вначале фиксирует истечение холодной смеси, а затем возникновение радиальных волн, вызывающих колебания давления в КС. Осциллограмма 2 в течение 0.1 с регистрирует слабые ПДВ, а затем радиальные волны. На нее в точности укладывается осциллограмма 3, полученная без инициирования детонации в КС при пережатии трубопроводов воздуха ($S_{total} = 27.7$ см²). Видно, что при истечении холодной смеси и при наличии радиальных волн, а также слабых ПДВ процессы в КС не влияют заметно на истечение воздуха. Этого нельзя сказать в случае формирования в КС сильных ПДВ (см. рис. 5).

На рис. 9 также приведена осциллограмма статического давления p_{c1} в КС № 1 ($K_{ex} = 2$,

осциллограмма 5). Видно, что при вращении одной и той же массы газа на большем радиусе камеры давление на цилиндрическую стенку $p = \rho v^2/r$ убывает значительно быстрее, чем отношение площадей S_c/S_{ex} . По этой причине невозможно проверить масштабный эффект, в частности сравнить камеры $d_{c1} = 500$ и 204 мм по количеству ПДВ. При обеспечении одинакового удельного расхода смеси ($g_\Sigma = 500$ кг/(с·м²)) в камере $d_{c1} = 204$ мм создается давление $p_{c1} \approx 50 \cdot 10^5$ Па, в то время как в камере $d_{c1} = 500$ мм устанавливается давление всего $p_{c1} \approx 12 \cdot 10^5$ Па, при котором детонация не развивается. А создание в ней давления $p_{c1} \approx 50 \cdot 10^5$ Па потребует удельного расхода смеси порядка $g_\Sigma \approx 2000$ кг/(с·м²), чего не позволяют возможности установки.

По рис. 2, 4, 7 видно, что в КС много предвестников ПДВ — косых ударных волн в свежей смеси и в продуктах реакции, поворачивающих поток вплоть до обратного направления. Подобное течение наблюдали и в камере $d_{c1} = 204$ мм [7]. Поворот потока переводит сверхзвуковое течение за фронтом ВС в дозвуковое и повышает давление в камере, способствуя в начале процесса появлению ПДВ. Влияние предвестников уменьшается с увеличением площади выходного сечения КС (см. рис. 2 и 4). При этом высота фронта ВС увеличивается. Следует отметить, что интенсивность предвестника АВ, подпитываемого скачками уплотнения из зоны реакции за фронтом, постоянно меняется, и нижняя точка фронта С перемещается вдоль радиуса. Особенно это заметно в КС № 3, где эти скачки более интенсивны. Во всех опытах резкое затухание ПДВ наблюдается практически на одном обороте. Анализ фоторегистрограмм показывает, что с уменьшением давления в камере поворот потока в предвестнике АВ всё ближе подходит к цилиндрической поверхности КС. Наступает момент, когда на фронте ВС участок свежей смеси уменьшается настолько, что его высоты недостаточно для распространения ПДВ, и режим НСД резко прекращается. Поэтому следует стремиться к ослаблению влияния предвестника, в частности, к увеличению выходного сечения КС, но при сохранении радиальной длины камеры. Одна из возможных причин отсутствия НСД в КС с диаметрами выходных отверстий $d_{c2} = 175$ и 250 мм — малое время пребывания в КС холодной смеси, недостаточное для ее воспламенения во всем объеме каме-

ры после инициирования. Другая причина — не обеспечивается необходимое начальное давление перед фронтом ВС.

3.3. Эффект барботирования керосина воздухом

В данной работе керосин перед подачей в камеру сгорания барботировался воздухом. Способ барботирования керосина обеспечивал его подачу в КС через форсунки с достаточно большими поперечными сечениями отверстий и благоприятно влиял на его детонационную способность с воздухом.

Проведем оценки насыщенности воздухом керосина для форсунки горючего. Известно, что плотность двухфазной смеси описывается уравнением $\rho = \alpha_f \rho_f + \alpha_a \rho_a$, где α_f и α_a — объемные доли керосина и воздуха, ρ_f и ρ_a — их плотность. При одинаковой скорости фаз u из уравнений сохранения масс имеем $\alpha_f \rho_f u S_f = G_f$ и $\alpha_a \rho_a u S_f = G_{a,f}$, откуда $\alpha_f \rho_f / \alpha_a \rho_a = G_f / G_{a,f}$. Так как $\alpha_f + \alpha_a = 1$, по известным (вычисленным из эксперимента) значениям G_f и $G_{a,f}$ определяем объемные доли керосина и воздуха в двухфазной смеси из уравнений

$$\frac{(1 - \alpha_a) \rho_f}{\alpha_a \rho_a} = \frac{G_f}{G_{a,f}} \quad \text{и} \quad \alpha_a = \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \frac{G_f}{G_{a,f}} + 1 \right)^{-1},$$

где значение ρ_a вычисляется по давлению в коллекторе керосина. При большой поверхности контакта керосина с воздухом для оценки можно считать, что расширение воздуха от давления в ресивере до давления в коллекторе происходит изотермически.

Оценим объемные доли α_f и α_a при истечении холодной двухфазной смеси до и сразу после возникновения НСД для опыта (см. табл. 2 и рис. 5). До НСД имеем $\rho_a = 30 \text{ кг/м}^3$, $\rho_f = 800 \text{ кг/м}^3$, $G_f = 0.95 \text{ кг/с}$, $G_{a,f} = 0.84 \text{ кг/с}$. Подставляя эти значения в приведенную выше формулу, получаем $\alpha_a \approx 0.96$ и $\alpha_f \approx 0.04$. При возникновении НСД $\rho_a = 36 \text{ кг/м}^3$, $\rho_f = 800 \text{ кг/м}^3$, $G_f = 0.83 \text{ кг/с}$, $G_{a,f} = 0.84 \text{ кг/с}$. После подстановки их в формулу получаем практически те же значения: $\alpha_a \approx 0.96$ и $\alpha_f \approx 0.04$. В конце режима НСД $\rho_a = 15 \text{ кг/м}^3$, $\rho_f = 800 \text{ кг/м}^3$, $G_f = 0.77 \text{ кг/с}$, $G_{a,f} = 0.38 \text{ кг/с}$, и опять вычисленные значения те же — $\alpha_a \approx 0.96$ и $\alpha_f \approx 0.04$ с отличием в третьем знаке. Видно, что объемная доля воздуха в двухфазной смеси $\alpha_a \gg \alpha_f$, а

ее соотношение с жидкой фазой во время эксперимента практически не меняется. Массовое соотношение керосина и воздуха таково, что оно далеко от пределов детонации и безопасно для использования в системе подачи горючего. Зная объемные доли компонентов, можно рассчитать и скорости истечения двухфазной смеси из форсунки: $\alpha_a \rho_a u S_f = G_{a,f}$, откуда $u = G_{a,f} / (\alpha_a \rho_a S_f)$. Подставляя в последнее выражение значения параметров, получаем: до НСД — $u = 101.3 \text{ м/с}$, с возникновением НСД — 84.4 м/с , в конце режима НСД — 91 м/с . Таким образом, ПДВ тормозят поступление барботированного керосина в КС, хотя и в меньшей степени, чем подачу основного воздуха. И это несмотря на то, что отношение средних давлений в соответствующих коллекторах и в начале КС ($p_{m,f}/p_{c1}$ и $p_{m,a}/p_{c1}$) увеличивается (см. рис. 5).

С учетом того, что в режиме НСД интенсивно и с большей полнотой можно сжигать топливо в камерах малых габаритов, определяемых размером фронта детонационной волны, полученные экспериментальные данные по детонационному сжиганию керосина в воздухе могут найти практическое применение на транспорте, в энергетике и химической промышленности.

ВЫВОДЫ

Впервые в вихревой плоскорадиальной камере диаметром 500 мм с параллельными боковыми стенками, а также с одной конусной стенкой, уменьшающей степень сужения кольцевого канала к выходу из камеры, реализована непрерывная спиновая детонация смесей керосина с холодным воздухом. В камере с параллельными боковыми стенками наблюдали также пульсирующие вдоль радиуса кольцевые детонационные волны с частотой $0.16 \div 0.23 \text{ кГц}$. Исследована структура детонационных волн и течения в их окрестности, которые принципиально не отличались от наблюдаемых ранее при детонационном сжигании керосиновоздушной смеси в вихревой плоскорадиальной камере диаметром 204 мм. Во всех случаях наблюдали одну поперечную детонационную волну, вращающуюся со скоростью, близкой к скорости детонации Чепмена — Жуге. Фронт детонационной волны имеет предвестник — косую ударную волну в продуктах и в свежей смеси, затормаживающую сверхзвуковой поток за фронтом и поворачивающую его в противоположном

направлении. Течение за детонационной волной нестационарное с множеством более слабых нестационарных ударных волн, влияние которых на существование детонации ослабляется с уменьшением степени сужения канала камеры к выходу. Обнаружено сильное влияние поперечных детонационных волн на систему подачи, особенно воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Войцеховский Б. В.** Стационарная детонация // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 129, № 6. — С. 1254–1256.
2. **Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F.** Continuous spin detonations // J. Propul. Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1204–1216. — DOI: 10.2514/1.17656.
3. **Wolański P.** Detonative propulsion // Proc. Combust. Inst. — 2013. — V. 34, N 1. — P. 125–158. — DOI: 10.1016/j.proci.2012.10.005.
4. **Быковский Ф. А., Ждан С. А.** Современное состояние исследований непрерывной детонации топливоздушных смесей (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 31–46.
5. **Rankin B. A., Fotia M. L., Naples A. G., et al.** Overview of performance, application, and analysis of rotating detonation engine technologies // J. Propul. Power. — 2017. — V. 33, N 1. — P. 131–143. — DOI: 10.2514/1.B36303.
6. **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.
7. **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.
8. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 1. Экспериментальное исследование поля скоростей в переходном и стационарном режимах // ПМТФ. — 1999. — Т. 40, № 6. — С. 112–121.
9. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 2. Вихревая структура течения // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 1. — С. 41–49.
10. **Быковский Ф. А., Ждан С. А.** Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
11. **Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F., Tarnaikin A. E., Samsonov A. N.** Continuous detonation of a hydrogen-oxygen gas mixture in a 100-mm plane-radial combustor with exhaustion toward the periphery // Shock Waves. — 2020. — V. 30, N 3. — P. 235–243. — DOI: 10.1007/s00193-019-00919-x.
12. **Austin J. M., Shepherd J. E.** Detonation in hydrocarbon fuel blends // Combust. Flame. — 2003. — V. 132, N 1-2. — P. 73–90. — DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00422-4.

Поступила в редакцию 26.03.2021.

После доработки 01.04.2021.

Принята к публикации 21.04.2021.