

УДК 534.2,546.2

ДЕТОНАЦИОННОЕ СЖИГАНИЕ СМЕСИ КЕРОСИН — ВОЗДУХ В ВИХРЕВОЙ РАДИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ ГЕОМЕТРИИ НА ВХОДЕ И ВЫХОДЕ

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

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

Реализованы и исследованы режимы детонационного сжигания двухфазной смеси авиационный керосин ТС-1 — воздух в вихревой радиальной камере диаметром 500 мм с истечением к центру при изменении геометрии на входе и выходе из камеры. Воздух в камеру подавался через вихревую форсунку, а керосин, барботирующий воздухом, — через каналы встречного направления. Через прозрачные окна в камере сгорания проводилась оптическая регистрация процесса высокоскоростной камерой с частотой 420 000 кадр/с. В камере сгорания со свободным выходом и расширяющимся соплом наблюдали непрерывную спиновую детонацию с одной вращающейся детонационной волной со скоростью $1.68 \div 2.17$ км/с, близкую к скорости детонации Чепмена — Жуге, или пульсирующую детонацию с радиальными волнами частотой $0.14 \div 0.26$ кГц. Установка радиальных перегородок приводила к пульсирующей детонации или горению. При непрерывной спиновой детонации расход воздуха составлял $3.6 \div 11.7$ кг/с, керосина — $0.2 \div 0.77$ кг/с, а коэффициент избытка горючего изменялся в пределах $0.63 \div 2.5$.

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

DOI 10.15372/FGV2022.9283
EDN AIRSRP

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие активно проводятся исследования непрерывной спиновой детонации (НСД) в кольцевых и радиальных камерах сгорания (КС) с целью разработки детонационных двигателей. Исследования режимов НСД в плоскорадиальных детонационных камерах берут свое начало от работ Б. В. Войцеховского [1, 2]. Обзоры современного состояния экспериментальных исследований НСД в кольцевых камерах сгорания топливокислородных и топливовоздушных смесей представлены в [3–13].

Кроме основного варианта конструкции кольцевых КС, рассматривался вариант геометрии КС в форме диска, так называемые плоскорадиальные детонационные камеры (ПДК), с целью значительного уменьшения длины КС. Первые экспериментальные исследования режимов НСД в ПДК с внешним диаметром 80, 204 и 500 мм при раздельной подаче окислителя и горючего были проведены в России [14–19]. Режимы НСД реализованы в топливокислородных газовых смесях [14], в топли-

вовоздушных смесях с газообразным (водород, метан), жидким (керосин, дизельное топливо) [15] и твердым (уголь) [16–19] горючим. Оптическая регистрация детонационных процессов проводилась через два радиальных окна. Наблюдалась структура поперечных детонационных волн (ПДВ) в камере сгорания, определялись частота вращения ПДВ и их скорость.

В последовавших затем работах [20–24] досконально изучались процесс инициирования, характеристики распространения и структура волн непрерывной детонации в ПДК различных размеров и конфигураций для газовых смесей водород — кислород [20], этилен — кислород [21] и водород — воздух [22–24] с расходом горючей смеси меньше 1 кг/с.

Практический интерес для детонационных двигателей и энергетических установок представляет сжигание в режиме НСД двухфазных смесей жидкое углеводородное горючее — воздух. В работе [25] в проточной вихревой ПДК диаметром 500 мм с истечением к центру были реализованы режимы детонационного сжигания двухфазной смеси авиационный керосин ТС-1 — воздух. В опытах варьировались диаметр выходного сечения камеры от 250 до 125 мм и форма одной из ее стенок.

Воздух в КС подавался через кольцевую щель шириной 5 и 1.8 мм. При расходах двухфазной горючей смеси до 25 кг/с наблюдали одноволновые режимы НСД со скоростями, близкими 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 [15]. Известно, что подача окислителя через щель ухудшает перемешивание и снижает полноту сгорания топлива [25]. Поскольку в реальных аэрокосмических и наземных устройствах требуется эффективное использование силы тяги, необходимо вихревой поток продуктов выровнять в осевом направлении. Кроме этого, у турбореактивных двигателей имеется препятствие на выходе из КС в виде турбины и вала, которые могут повлиять на процессы в камере сгорания.

Цель настоящей работы — реализация и изучение детонационного горения гетерогенных смесей жидккий керосин — воздух в вихревой радиальной КС диаметром 500 мм с подачей воздуха через форсунки и истечением продуктов сгорания к центру при варьировании ее геометрии на выходе.

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 стенками: плоской 3 и конусной 4 с углом 7° у основания и выход-

ным отверстием 5 диаметром $d_{c2} = 125$ мм. Расстояние между стенками вблизи цилиндрической стенки $\Delta = 15$ мм, а на краю выходного отверстия 5 — $\Delta_{ex} = 44$ мм. При этом площадь цилиндрической стенки равнялась $S_c = \pi d_{c1}\Delta = 235.6 \text{ см}^2$, а площадь кольцевого сечения КС на выходе — $S_{ex} = \pi d_{c1}\Delta_{ex} = 173 \text{ см}^2$. Площадь выходного отверстия КС в конусной стенке 4 была меньше и составляла $S_{ex}^1 = \pi d_{c2}^2/4 = 123 \text{ см}^2$.

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 300 отверстий форсунки воздуха (ФВ) 7 сечением 2×5 мм, направленных под углом 45° к радиусу КС. Отверстия нарезались на ребре форсунки толщиной $L_a = 5$ (ФВ1) или 12 мм (ФВ2). Площадь сечения отверстий $S_\delta = 30 \text{ см}^2$ близка к площади щели в проточной вихревой радиальной камере (ФВ0) [25] шириной $\delta = 1.8$ мм и толщиной (по радиусу) 5 мм ($S_\delta = 28.3 \text{ см}^2$). Коэффициент расширения КС на входе составлял $K_s = S_c/S_\delta = 7.85$. 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 и подача газокапельной смеси в КС осуществлялись аналогично [25].

Форсунка горючего (ФГ) 8 была сменной и имела 600 или 300 отверстий, равномерно распределенных по цилиндрической стенке под углом 45° к оси КС и попарно направленных встречно под углом 90° с общей площадью отверстий S_f . Геометрические параметры форсунок приведены в табл. 1. Форсунки пронумерованы в порядке возрастания суммарной площади сечения отверстий. Здесь же приведены данные по ФГ1, через отверстия которой подавался чистый керосин (без барботирования).

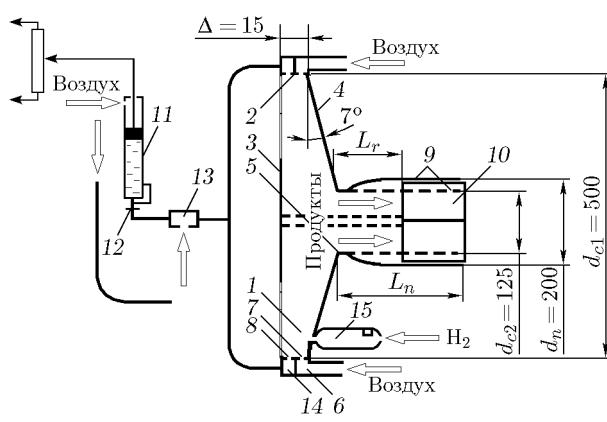


Рис. 1. Схема вихревой радиальной камеры сгорания ПДК-500

Таблица 1
Геометрические параметры
форсунок горючего на входе в КС

Номер форсунки	Размеры, мм	$S_f, \text{ см}^2$
ФГ1	$300 \times 0.3 \times 0.3$	0.27
ФГ2	$300 \times 0.4 \times 1$	1.2
ФГ3	$600 \times 0.6 \times 0.8$	2.88
ФГ4	$600 \times 1.2 \times 0.7$	5.04

Начальное давление в ресиверах воздуха основной подачи устанавливали равным $p_{r,a10} = p_{r,a20} = 60 \cdot 10^5$ Па, а для вытеснения керосина — $p_{r,f0} = (65 \div 85) \cdot 10^5$ Па. Расходы воздуха и горючего, определяемые по методике [26], изменялись в диапазонах: основная подача воздуха — $G_a = G_{a1} + G_{a2} = 2.3 \div 29.2$ кг/с, подача воздуха, барботирующего керосин, — $G_{a,f} = 0.03 \div 0.95$ кг/с, подача керосина $G_f = 0.06 \div 2.05$ кг/с. Массовая доля воздуха в барботируемом керосине по отношению ко всему расходу воздуха $m_{a,f} = G_{a,f}/(G_{a,f} + G_a) = G_{a,f}/G_{a\Sigma}$ изменялась в зависимости от форсунки керосина и длительности эксперимента и составляла $0 \div 0.315$. Поскольку керосин подавался вблизи выхода основного воздуха из форсунки, расход барботирующего воздуха суммировался с основным при расчете коэффициента избытка керосина: $\phi = (G_f/G_{a\Sigma})\chi_{f,st} = 0.39 \div 2.5$, где $\chi_{f,st} = G_{a\Sigma}/G_{f,st} = 15.24$ — стехиометрический коэффициент керосина. Для указанных выше абсолютных расходов воздуха и керосина удельные расходы гетерогенной смеси на входе КС варьировались в диапазоне $g_\Sigma = (G_{a\Sigma} + G_f)/S_c = 106 \div 1280$ кг/(с · м²).

Образующуюся в КС смесь керосина и воздуха инициировали аналогично [25]. Продукты горения выбрасывались в атмосферу с давлением $p_a = 10^5$ Па через выходное отверстие 5 или присоединенное к нему сопло (цилиндр) 9 длиной $L_n = 150$ мм. Диаметр выходного отверстия сопла составлял $d_n = 200$ мм, а радиус стенки на входе сопла — 100 мм. Для выравнивания потока продуктов в осевом направлении на выходе из КС использовался выпрямитель в виде крестовины из плоских пластин 10 длиной 80 мм, установленный в сопле на расстоянии $L_r = 70$ мм от отверстия 5, а в цилиндре — на всю длину.

Оптическая регистрация процессов в КС, а также регистрация давления в ресиверах, коллекторах и камере сгорания проводились аналогично [25].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В области указанных выше параметров подачи компонентов гетерогенной смеси керосин — воздух ($G_{a\Sigma}, G_f$) были исследованы возможности реализации режимов НСД в камере ПДК-500 при изменении геометрии на входе и выходе из КС. На входе в КС этого достигали установкой форсунок воздуха ФВ1 или

ФВ2 а также форсунок горючего ФГ1–ФГ4 (см. табл. 1); на выходе из КС — за счёт свободного истечения из выходного отверстия 5, сопла или цилиндра 9 с установкой выпрямителя 10 в сопле или цилиндре (см. рис. 1).

2.1. КС со свободным выходом

Исследовалось влияние геометрии входа в КС на возможность реализации НСД. Первая серия опытов проведена при установке форсунок воздуха ФВ1 и горючего ФГ3. В диапазоне удельных расходов смеси керосин — воздух относительно площади цилиндрической поверхности КС $g_\Sigma = 163 \div 557$ кг/(с · м²) и коэффициентов избытка горючего $\phi = 0.63 \div 2.5$ был реализован стабильный режим НСД с одной ПДВ, вращающейся в направлении закрутки потока со скоростью $D = 1.68 \div 2.17$ км/с относительно наружного диаметра камеры. Поскольку средняя скорость потока смеси перед фронтом ПДВ $v_m \approx 230$ м/с [25], их реальные скорости детонации уменьшались на эту величину — $D_p = D - v_m = 1.45 \div 1.94$ км/с.

Во всех опытах после инициирования в течение ≈ 35 мс режиму НСД предшествовало неустойчивое горение, нерегулярные радиальные волны детонации, а также неустойчивые ПДВ. На рис. 2 представлена линейная фоторегистограмма через два окна ПДК-500 развития НСД от момента инициирования до устойчивого детонационного режима с ПДВ (время отсчитывается справа налево).

Видно, что после инициирования в течение ≈ 30 мс режиму НСД предшествовало неустойчивое горение, нерегулярные радиальные волны детонации (рис. 2, а, б), а также неустойчивые ПДВ (рис. 2, в), которые сменялись устойчивым режимом НСД (рис. 2, г). Развитие НСД происходило лишь в половине экспериментов. В другой половине развивался режим с пульсирующими детонационными волнами.

На рис. 3 приведены фрагмент типичной линейной фоторегистограммы НСД в системе волны (рис. 3, а) и реконструкция ПДВ в плоскости КС (рис. 3, б), построенные по методикам [25, 26].

Фоторегистрация через два окна позволяла однозначно определять [25]: а) направление вращения волн, так как в одном окне происходит компенсация скорости, а в другом — ее полная раскомпенсация; б) четность или нечетность количества ПДВ. В верхнем окне (рис. 3, а) волны движутся слева направо, а в

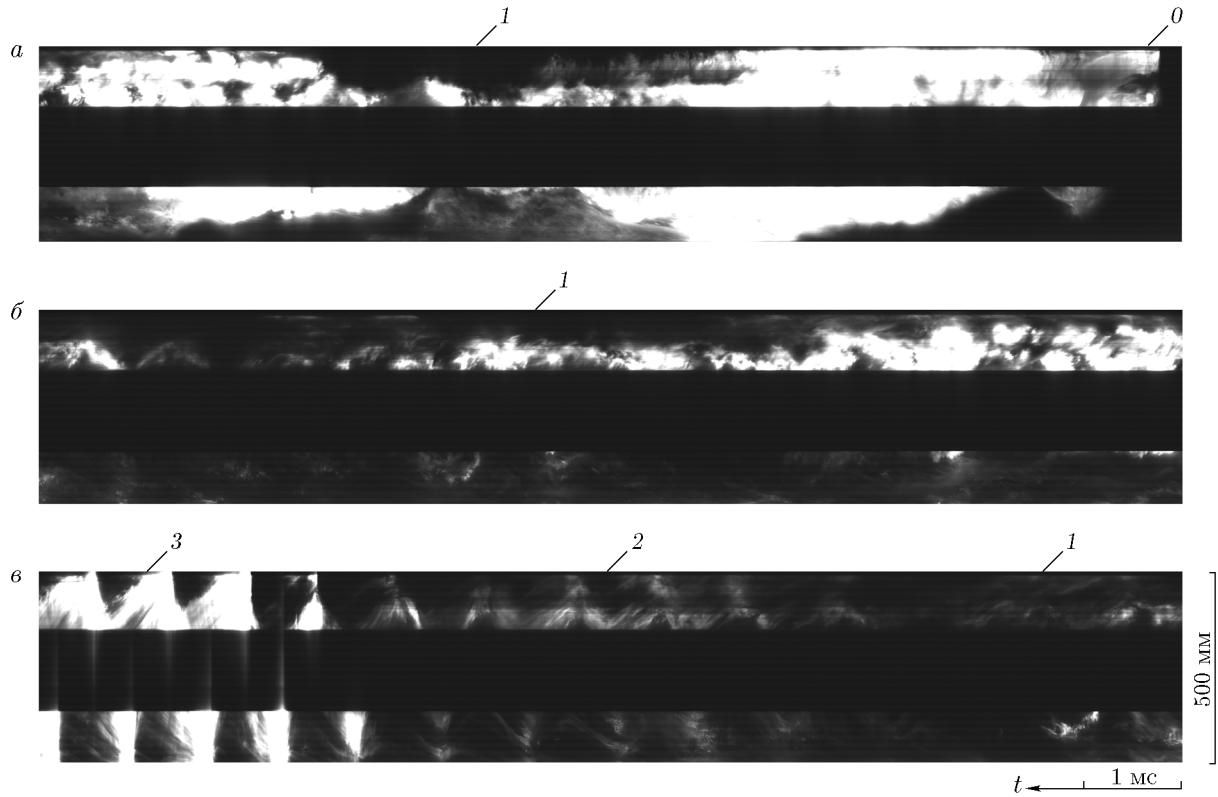


Рис. 2. Линейная фоторегистрограмма развития НСД от момента инициирования до устойчивого режима с ПДВ с разбивкой на три дорожки по 12 мс:
 $a — t = 0 \div 12$ мс, $b — t = 12 \div 24$ мс, $c — t = 24 \div 36$ мс; 0 — момент инициирования, 1 — неустойчивое горение с признаками ПД и ПДВ, 2 — зарождение ПДВ, 3 — устойчивые ПДВ

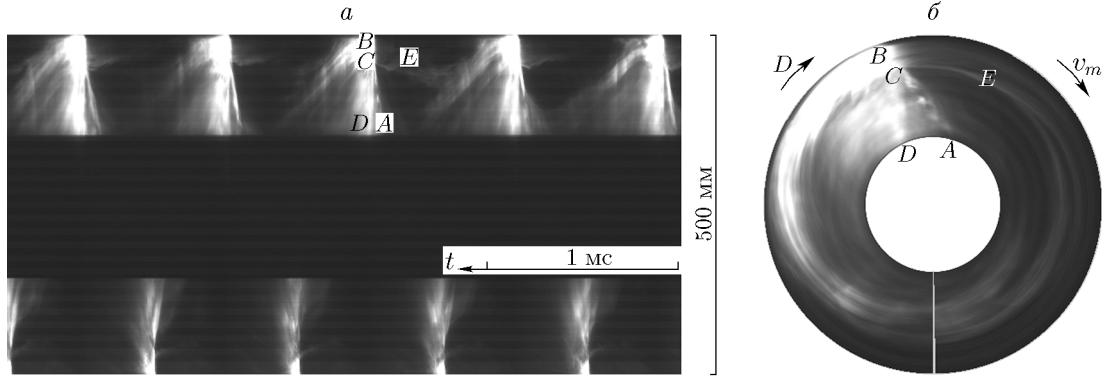


Рис. 3. Линейная фоторегистрограмма НСД через два окна (фрагмент) (a); реконструкция ПДВ в плоскости КС (b) ($G_{a\Sigma} = 5.1$ кг/с ($g_{\Sigma} = 227$ кг/(с · м 2)), $\phi = 0.98$, $D = 2.15$ км/с ($f = 1.37$ кГц, $n = 1$))

нижнем — в обратном направлении. Из рис. 3, a определялось время появления фронта ПДВ BC против окна — $\Delta t = 0.73$ мс, которое позволяло однозначно находить их частоту: $f = 1/\Delta t = 1.37$ кГц. При известном числе волн n , расположенных на периметре КС, по частоте f согласно формуле [26] $Dn = \pi d_{c1}/\Delta t$ опреде-

ляется скорость ПДВ D относительно наружного диаметра камеры. Поскольку на фоторегистрограмме рис. 3, a фронты ПДВ в верхнем и нижнем окнах располагаются не напротив друг друга, то число ПДВ n — нечетное. В данном случае может быть одна ($n = 1$) или три волны ($n = 3$). Подстановка $n = 3$ в

формулу для скорости D дает значение скорости $D = 0.716$ км/с, которая не соответствует детонационной. Следовательно, однозначно определяем, что на фоторегистограмме НСД (рис. 3, а) изображен одноволновый ($n = 1$) процесс НСД со скоростью ПДВ относительно наружного диаметра камеры $D = 2.15$ км/с.

Несмотря на то, что ПДВ в КС вращаются в одном направлении (см. рис. 3, б), а в области окон — в противоположном, на фоторегистограмме их зарегистрированные структуры практически одинаковы и кажется, что волны в окнах движутся в одном направлении — такова специфика фоторегистрации в системе волн. Направление вращения можно определить по отчетливости изображения ПДВ и течения в ее окрестности. В данном случае в верхнем окне происходила компенсация скорости фронта ПДВ (направление движения ПДВ совпадало с направлением сканирования изображения видеокамерой), поэтому фронт волны и течение в ее окрестности проявились достаточно отчетливо, а в нижнем — с раскомпенсацией скорости фронта ПДВ (движение волны в обратном направлении). Поэтому в нижнем окне структура фронта и течение в его окрестности зафиксированы с меньшей интенсивностью съемки. Направление вращения волн и их приблизительную скорость можно также определять по методике, изложенной в [27].

На рис. 3, а в верхнем окне наблюдается регулярная структура ПДВ с явно выраженным фронтами и течениями в их окрестности. Здесь BC — поперечный фронт детонационной волны, CD — шлейф (косая ударная волна в продуктах детонационного горения), BA — косая ударная волна («предвестник»), формируемая из зоны реакции за ПДВ. Также проявляется множество косых ударных волн, тормозящих сверхзвуковой поток продуктов за и перед фронтом ПДВ BC . Эти косые волны поворачивают поток в обратную сторону (в сторону цилиндрической поверхности). На фоторегистограмме высвечивается контактная граница E между свежей смесью и продуктами детонации, которая сначала опускается вниз по потоку, а затем поднимается вверх. Ее пересечение с ПДВ определяет высоту детонационного фронта BC — $h \approx 50$ мм. Поскольку продукты за фронтом ПДВ тормозятся в косых скачках уплотнения и повышают свою температуру, при пересечении шлейфа CD они ярко светятся. Подобная картина волн наблюдалась

ранее в ПДК-204 [15] и ПДК-500 [25].

На рис. 3, б приведена реконструкция фоторегистограммы с рис. 3, а детонационной волны BCD и течения в ее окрестности в плоскости КС. Показаны направления вращения ПДВ (D) и смеси (v_m). Видно, что реальная структура ПДВ значительно отличается от структуры, изображенной на фоторегистограмме. Расстояния между точками течения все более растягиваются по радиусу от B до выхода из КС.

Для этого опыта приведены осциллограммы давлений в системе подачи (рис. 4, а) и в КС (рис. 4, б). Показан также момент инициирования In и ход поршня расходомера керосина L_p (рис. 4, а).

Размещение на рис. 4, б осциллограмм давлений в коллекторах воздуха ($p_{m,a}$) и керосина ($p_{m,fa}$) нагляднее показывает их сравнение с давлением в КС. Следует отметить, что режим НСД, фиксируемый видеокамерой, продолжался еще 0.16 с после окончания записи осцилло-

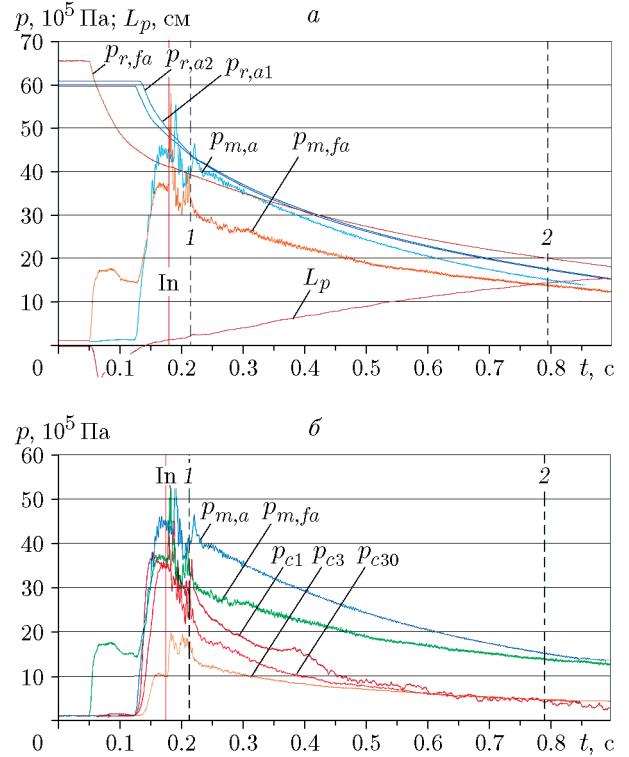


Рис. 4. Осциллограммы давлений в системе подачи (а) и в КС (б):

L_p — ход поршня расходомера керосина, In — момент инициирования, 1 — начало процесса с ПДВ, 2 — параметры НСД в момент времени, соответствующий ПДВ на рис. 3

грамм.

Порядок проведения эксперимента следующий. Через $t = 0.05$ с после запуска системы регистрации открывается клапан воздуха в системе подачи керосина. Часть воздуха поступает в коллектор керосина, а другая часть создает давление на поршень расходомера 11 ($p_{r,fa}$). Мембрана 12 прорывается, и барботированный воздухом керосин в смесителе 13 поступает в коллектор 14, а затем в КС, поднимая давление до $p_{m,fa} \approx 17.5 \cdot 10^5$ Па и $p_{c1} \approx 1.2 \cdot 10^5$ Па соответственно. Вследствие инерции поршневой системы давление под мембранный повышается быстрее, чем над мембранный, поэтому наблюдается обратный ход поршня L_p , который через 0.02 с восстанавливает движение в нужном направлении. При $t = 0.125$ с открываются клапаны системы подачи основного воздуха в КС, давление в коллекторе воздуха повышается до $p_{m,a} = 45 \cdot 10^5$ Па, а в КС — до $p_{c1} \approx 37 \cdot 10^5$ Па. Под воздействием давления в КС поднимается давление в коллекторе керосина, и к моменту инициирования их разность составляет $\Delta p = p_{m,fa} - p_{c1} \approx 2.5 \cdot 10^5$ Па. Движение поршня расходомера затормаживается. Образующаяся в КС смесь керосин — воздух наполняет баллон для инициирования 15, в который одновременно начинает поступать тонкой струей водород. Момент инициирования ($t \approx 0.175$ 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 с нерегулярными волнами, переходящее через 0.036 с в режим НСД. Давление в начале камеры p_{c1} , будучи больше давления на выходе из камеры p_{c3} , при развитии НСД выравнивается с p_{c3} . Устойчивый режим НСД длился около

1 с. Установившийся в начале опыта режим с $\phi \approx 1.0$ существовал до окончания опыта. Так как на выходе из КС наклон траекторий к образующей окружности выходного отверстия меняется за период вращения ПДВ (см. рис. 3), а также меняется интенсивность трубок тока продуктов, то зафиксированное неподвижными датчиками полное давление p_{c30} лишь приблизительно отображает его динамику в КС на выходе. Поскольку наблюдается незначительное отличие статического давления p_{c3} от полного давления p_{c30} , можно утверждать, что в кольцевом сечении на краю выходного отверстия КС существует докритическое течение. Критическое же истечение продуктов было в районе выходного отверстия, площадь которого в 1.4 раза меньше площади кольцевого сечения. Основные параметры режима НСД приведены в табл. 2 (первая строка). Стрелками показано изменение параметров в течение эксперимента. Поскольку значения ϕ и D в течение опыта изменялись немонотонно, в табл. 2 приведены пределы их изменения.

Процесс НСД сопровождался интенсивным механическим и тепловым воздействием на стенки камеры: за время детонационного сжигания (около 1 с) ослаблялось натяжение шпилек, стягивающих стенки камеры, а ребра форсунки воздуха, выполненные из конструкционной стали, в некоторых местах полностью оплавлялись (рис. 5, a). Замена материала форсунки ФВ1 на бронзу не устранила оплавление ребер. Параметры непрерывной детонации в КС с форсункой из бронзы (см. табл. 2, вторая строка) и из стали (первая строка) были близки.

Вторая серия опытов проведена при установке форсунок воздуха ФВ2 и горючего ФГ3.

Таблица 2

Параметры НСД в КС со свободным выходом

Форсунка воздуха	$p_{m,a}/p_a$	g_Σ , кг/(с · м ²)	ϕ	n	D , км/с	p_{c1}/p_a	p_{c3}/p_a	Режим
ФВ1 (сталь)	$43 \rightarrow 13$	$510 \rightarrow 163$	$0.81 \div 1.07$	1	$1.93 \div 2.17$	$31.8 \rightarrow 2.4$	$20 \rightarrow 4.8$	НСД
ФВ1 (бронза)	$44 \rightarrow 13.4$	$557 \rightarrow 215$	$0.63 \div 0.93$	1	$1.92 \div 2.1$	$33 \rightarrow 4.2$	$20 \rightarrow 4.7$	НСД
ФВ2	$40 \rightarrow 16$	$458 \rightarrow 200$	$0.85 \div 2.5$	1	$1.68 \div 2.06$	$25 \rightarrow 2.8$	$20 \rightarrow 4$	НСД
ФВ0 [25]	$41 \rightarrow 19$	$470 \rightarrow 255$	$1.31 \rightarrow 2.24$	1	$1.96 \rightarrow 1.25$	$17.5 \rightarrow 6.3$	$19 \rightarrow 7$	НСД

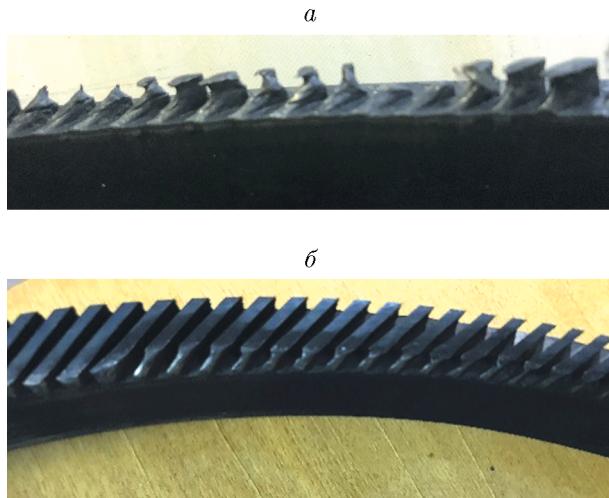


Рис. 5. Фрагменты фотографий форсунок воздуха после режима НСД продолжительностью около 1 с:

a — ФВ1, $L_a = 5$ мм, *б* — ФВ2, $L_a = 12$ мм

И только увеличение толщины ребра форсунки воздуха до $L_a = 12$ мм сохранило ее целостность с некоторыми незначительными местными оплавлениями (рис. 5, б).

Толщина ребер форсунок ФВ1 и ФВ2 не оказывала заметного влияния на режим НСД. Параметры режима с форсункой ФВ2 представлены в табл. 2 (третья строка). Отметим, что при подаче воздуха через кольцевую щель (ФВ0) [25] оплавления краев ее ребер не наблюдалось, а диапазоны режимов НСД по расходу гетерогенной смеси, коэффициенту избытка горючего, давлению в КС были более узкими (четвертая строка).

При уменьшении площади отверстий форсунок керосина (ФГ1, ФГ2) и их количества в тех же диапазонах по ϕ не удалось возбудить режимы НСД. Наблюдали лишь режи-

мы пульсирующей детонации (ПД) в пределах удельных расходов топливной смеси $g_{\Sigma} = 650 \div 1000$ кг/(с · м²). При подаче в КС чистого керосина форсункой ФГ1 не удалось возбудить ни горения, ни детонации. Использование форсунки с большой площадью отверстий ФГ4 сопровождалось сменой режимов ПД и слабой НСД.

2.2. КС с установкой сопла на выходе

Поскольку в реальных аэрокосмических и наземных устройствах требуется эффективное использование потока продуктов при сверхзвуковых истечениях из отверстия КС, необходимо дальнейшее расширение потока в сопле.

В КС с системой подачи воздуха через форсунку ФВ2 и керосина через ФГ3 при установке расширяющегося сопла на выходе из камеры также реализуется режим НСД.

В диапазоне удельных расходов смеси керосин — воздух $g_{\Sigma} = 450 \rightarrow 167$ кг/(с · м²) и коэффициентов избытка горючего $\phi = 0.93 \div 1.17$ наблюдали стабильный режим НСД с одной ПДВ, вращающейся со скоростью $D = 1.89 \div 2.04$ км/с относительно наружного диаметра камеры. Структура ПДВ аналогична приведенной на рис. 3. Осциллограммы детонационного режима близки к приведенным на рис. 4, а его параметры представлены в табл. 3 (первая строка). В течение опыта (около 1 с) форсунка воздуха ФВ2 сохраняла свою целостность.

2.3. КС с установкой цилиндра диаметром 125 мм

Установка цилиндра длиной 150 мм перемещала звуковую поверхность от отверстия в стенке КС на конец цилиндра [28]. В результате в диапазоне расходов $G_{a\Sigma} = 20 \rightarrow 12$ кг/с

Таблица 3

Параметры НСД и ПД в камерах сгорания (ФВ2, ФГ3) с соплом или цилиндром на выходе

Выход из КС	$p_{m,a}/p_a$	g_{Σ} , кг/(с · м ²)	ϕ	n	D , км/с	p_{c1}/p_a	p_{c3}/p_a	Режим
Сопло	38 → 14.3	450 → 167	0.93 ∕ 1.17	1	1.89 ∕ 2.04	25 → 2.4	20 → 4.4	НСД
Сопло с перегородками	49 → 28	950 → 625	0.28 ∕ 0.71	—	—	34.4 → 24	27 → 18	ПД
	28	625	0.71	1	1.8	20	10	НСД
Цилиндр	42 → 24	846 → 541	0.39 ∕ 0.92	—	—	36.6 → 19	25 → 7	ПД
Цилиндр с перегородками	48 → 37	900 → 850	0.4 ∕ 0.5	—	—	36.6 → 29	37 → 15	ПД



Рис. 6. Пульсирующая детонация в КС при установке цилиндра на выходе из камеры ($G_{a\Sigma} = 18.4 \text{ кг/с}$, $\phi = 0.49$, $f \approx 0.2 \text{ кГц}$)

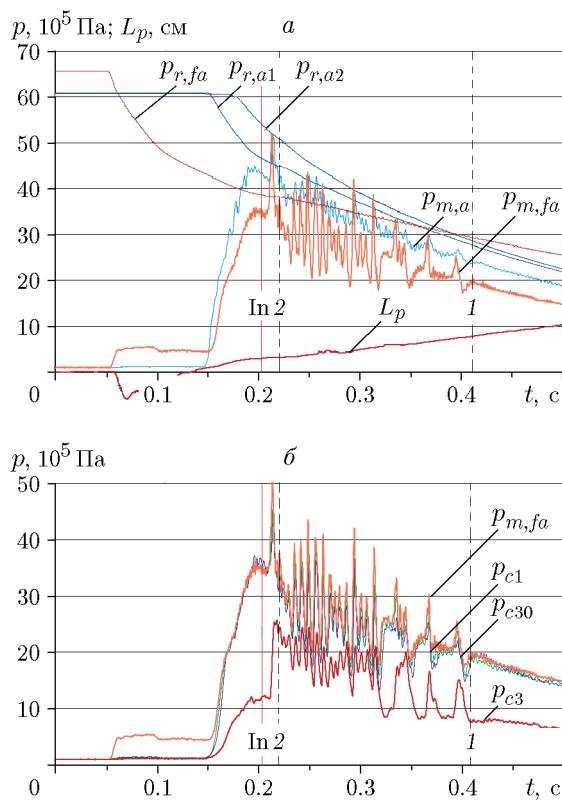


Рис. 7. Осциллограммы давлений в системе подачи (а) и в КС (б):
 L_p — ход поршня расходомера керосина, In — момент инициирования, 1 — конец процесса с ПД, 2 — параметры процесса в момент времени, соответствующий ПД на рис. 6

($\phi = 0.39 \rightarrow 1.1$) наблюдали детонационное сжигание в режиме пульсирующих вдоль радиуса КС детонационных волн AB с частотой $f = 0.26 \rightarrow 0.14 \text{ кГц}$ (рис. 6).

Радиальная ударная волна AB , идущая со стороны отверстия в КС, подходила к цилиндрической поверхности и поджигала натекающую смесь. Иногда, как показано на рис. 6, она воспламеняла смесь до подхода к цилиндрической поверхности. Процесс с ПД был кратким — всего около 190 мс. Основные параметры режима приведены в табл. 3 (четвертая

строка).

На рис. 7, а приведены осциллограммы давлений и ход поршня расходомера в системе подачи воздуха и горючего, а на рис. 7, б — давление в КС. Здесь же приведено и давление в коллекторе керосина. Порядок проведения эксперимента идентичен описанному в п. 2.1.

Датчики давления фиксируют частоту ПД, но искажают профиль волн. При затухании процесса видны колебания трех волн с частотой $f \approx 0.04 \text{ кГц}$ с наложением на них высокочастотной ПД с частотой $f \approx 0.25 \text{ кГц}$. Значения статического давления в коллекторе керосина и начале КС, а также полного давления вблизи выходного отверстия практически одинаковы. Характер этих давлений близок к одноименным давлениям в переходном процессе до появления ПДВ в КС со свободным выходом (см. рис. 4, а, б).

2.4. КС с установкой перегородок в сопле и цилиндре

Для того чтобы создать потоку продуктов осевое направление движения, в сопле и цилиндре устанавливался выпрямитель из четырех перегородок. Установка выпрямителя в сопле лишь на короткое время позволила реализовать НСД (около 6 мс) со скоростью $D \approx 1.8 \text{ км/с}$, после чего процесс горения в КС прекратился. Данные по режимам приведены в табл. 3 (вторая и третья строки).

Установка перегородок в цилиндре не изменила характер процесса в КС, описанного выше, лишь значительно его сократила — до 40 мс. Наблюдались продольные волны, не трансформировавшиеся в НСД (см. табл. 3, пятая строка).

При установке в цилиндр выпрямителя, примыкающего к выходному отверстию стенки КС, поступающая смесь с расходом $G_{a\Sigma} = 25 \rightarrow 20 \text{ кг/с}$ ($\phi \approx 1.0$) воспламенилась, но неустойчивое горение в течение около 50 мс не преобразовалось в детонационный режим.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описанные выше опыты проводили в такой же вихревой радиальной камере ПДК-500, что и в [25], — с наклонной стенкой и выходным отверстием диаметром $d_{c2} = 125$ мм. Однако кольцевая щель для подачи воздуха была заменена рядом отверстий, ориентированных параллельно оси камеры при сохранении их площади поперечного сечения (форсунки ФВ1, ФВ2). Возникает вопрос, можно ли исследуемую КС считать проточной? Анализ геометрии существующих жидкостных реактивных двигателей, описанных в обзоре [29], показывает, что площадь всех отверстий форсунок составляет $0.5 \div 5\%$ от площади днища камеры. В нашем случае площадь отверстий форсунки для подачи воздуха в КС составляет $\approx 13\%$ от площади цилиндрической поверхности камеры, поэтому данную КС можно считать проточной.

Оплавление стенок отверстий форсунки ФВ1 (см. рис. 5, а) указывает на существование достаточно сильной детонационной волны с пиком давления в сотни атмосфер и высокой плотностью горячих продуктов. Потребовалось обеспечить эффективный отвод тепла от ребер форсунки. Для этого материал ребра форсунки ФВ1 заменили на бронзу, учитывая более высокую ее теплопроводность (в 2 раза по сравнению со сталью), несмотря на более низкую ее температуру плавления (в 1.5 раза). Попытка не увенчалась успехом — ребра разрушались за время одного эксперимента. Решением поставленной задачи было удлинение каналов форсунки воздуха на ребре $L_a = 12$ мм, при котором увеличивался металлический контакт ребер с конструктивными элементами КС. Лишь через несколько опытов в отдельных местах форсунки ФВ2 наметились незначительные разрушения ребер (см. рис. 5, б). Таким образом, выяснилось, что ма-

териал форсунки должен иметь высокую теплопроводность (возможно, медь) или высокую температуру плавления (вольфрам, карбиды гафния, циркония, титана), а также достаточно большую площадь теплоотвода от поверхности отверстий. При длительной работе КС необходимо принудительное и более интенсивное охлаждение ребер форсунки, чем цилиндрической и боковых стенок.

Как и в работе [25], жидкий керосин перед подачей в камеру сгорания барботировался воздухом при объемной доле воздуха в барботирующем керосине, которая далека от пределов детонации и безопасна для использования в системе подачи горючего. Для сравнения объемных концентраций фаз (газовой α_a и жидкой α_f) и скоростей истечения смеси u их значения приведены в табл. 4 при значении исходного расхода керосина $G_f = 0.6$ кг/с. Из табл. 4 следует, что при одинаковом расходе керосина с увеличением степени его насыщения воздухом скорость смеси на входе в КС уменьшалась, несмотря на увеличение площади сечения отверстий форсунок. Методика вычисления значений α_a , α_f и u двухфазной смеси подробно описана в работе [25].

При установке форсунки ФГ1 не удалось возбудить в КС ни горения, ни детонации. Барботирование керосина до $\alpha_f = 0.1$ (форсунка ФГ2) позволило возбудить в КС пульсирующую детонацию. Устойчивый режим НСД реализован только с форсункой ФГ3. Однако это не означает, что в других радиальных камерах форсунки ФГ1, ФГ2, ФГ4 не обеспечат режимы НСД. Например, в плоскорадиальной камере диаметром $d_{c1} = 204$ мм режим НСД был реализован при подаче в КС чистого керосина ($\alpha_f = 1$) [15]. Поскольку для вихревых плоскорадиальных камер масштабный эффект не соблюдается [25], выбор наиболее

Таблица 4

Параметры барботированного керосина перед подачей в КС для форсунок горючего из табл. 1

Форсунка	G_f , кг/с	$G_{a,f}$, кг/с	α_a	α_f	u , м/с	Режим
ФГ1	0.96	—	0	1.0	70	—
ФГ2	0.6 → 0.97	0.37 → 0.23	0.9 → 0.98	0.1 → 0.02	68 → 95	ПД
ФГ3	0.6 → 0.265	0.46 → 0.23	0.93 → 0.98	0.07 → 0.02	39 → 52	НСД
ФГ4	0.6 → 0.486	0.4 → 0.185	0.94 → 0.978	0.06 → 0.02	23.6 → 53	ПД ↔ НСД

благоприятной конструкции форсунки будет зависеть от конкретной геометрии КС. Дисперсия капель керосина на входе в КС при разной степени насыщения воздухом требует специального изучения.

Описанные выше опыты для смеси керосин — воздух с форсункой воздуха ФВ2 и керосина ФГ3 в камерах ПДК-500 со свободным выходом и соплом показывают (см. табл. 2, 3), что в широкой области расходов смеси реализуются режимы НСД со скоростями ПДВ, близкими к скоростям идеальной детонации Чепмена — Жуге D_{CJ} [30].

Зависимости скорости ПДВ D от удельного расхода смеси керосин — воздух g_Σ и коэффициента избытка горючего ϕ представлены на рис. 8. Там же для сравнения приведены данные из работ [25, 30]. Видно, что скорости ПДВ (рис. 8, а, кривые 1–3) в широком диапазоне расходов смеси g_Σ практически постоянны и уменьшаются лишь при приближении к нижним пределам существования НСД по g_Σ . Сравнение кривых 1 и 4 для богатых по горючему смесей (см. табл. 2, строки 3 и 4) показывает, что при замене щели на отверстия форсунок скорости ПДВ увеличиваются на 8–10 %. Следует отметить, что прекраще-

ние НСД для кривых 1 и 4 связано не столько с минимальным удельным расходом топливовоздушной смеси ($g_\Sigma = 200$ и $255 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$), сколько с большим значением коэффициента избытка горючего ($\phi_{max} = 2.5$ и 2.24 соответственно). В режимах НСД с $\phi < 1$ (кривая 2, объединяющая опыты со стальными и бронзовыми ребрами в форсунке ФВ1, табл. 2, стро-ки 1 и 2) удельный расход смеси уменьшается до $g_\Sigma = 163 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, а в опытах с соплом (кривая 3) — до $g_\Sigma = 167 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. На рис. 8, а две крайние точки справа для меньших g_Σ соответствуют незарегистрированным значениям ϕ . Снижение уровней минимальных удельных расходов, при которых реализуется режим НСД, позволило уменьшить и минимальные давления в КС с $p_{c1,min} = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}$ [25] до $p_{c1,min} = 2.4 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Зависимости скорости ПДВ от коэффициента избытка горючего (кривые 1–4) представлены на рис. 8, б; как и в классической детонации (кривая 5 [30]), они имеют колоколообразную форму. Отличие заключается в том, что при НСД максимальная скорость ПДВ находится в области стехиометрии ($\phi \approx 1$), что наблюдалось и для других топливовоздушных смесей [26], а при классической детонации она сдвинута в область богатой смеси ($\phi = 1.3$). В КС со свободным выходом (кривая 2) определено минимальное значение коэффициента избытка горючего $\phi = 0.63$. Однако оно не является предельным, поскольку скорость ПДВ оставалась достаточно высокой — $D = 1.92 \text{ км}/\text{s}$. При меньших значениях ϕ опыты не проводились. Из рис. 8 видно, что установка в КС сопла снижает скорость ПДВ, кроме области пределов детонации по g_Σ .

Вследствие вихревой подачи воздуха в КС, тангенциальная составляющая средней скорости движущейся свежей смеси перед фронтом ПДВ составляет $v_m \approx 230 \text{ м}/\text{s}$ [25]. Поскольку ПДВ движется по направлению движения смеси, ее скорость относительно потока смеси будет равна $D_p = D - v_m$. На рис. 9 представлены зависимости скорости ПДВ D_p , отнесенной к скорости идеальной детонации Чепмена — Жуге D_{CJ} [30], от коэффициента избытка горючего.

Для построения кривых взяты значения D и ϕ , приведенные на рис. 8, б в диапазоне ϕ из [30]. Значения скорости ПДВ относительно наружного диаметра камеры, превышающие скорость идеальной детонации Чепмена — Жуге

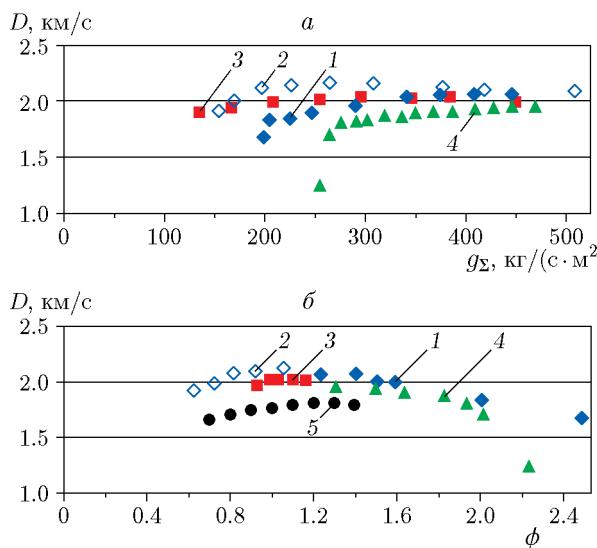


Рис. 8. Зависимости скорости ПДВ смеси керосин — воздух от удельного расхода смеси (а) и коэффициента избытка горючего (б) в камере сгорания ПДК-500 (ФГ3):

1, 2 — КС со свободным выходом: 1 — ФВ2, $\phi > 1$; 2 — ФВ1, $\phi < 1$; 3 — КС (ФВ2) с соплом; 4 — щель, $\delta = 1.8 \text{ мм}$ [25]; 5 — $D_{CJ}(\phi)$ [30]

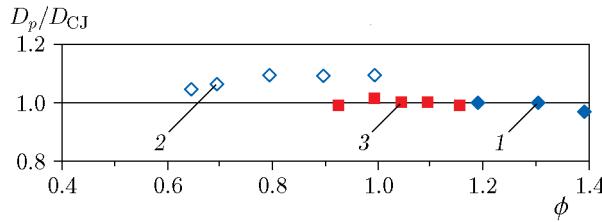


Рис. 9. Зависимость скорости ПДВ, отнесенной к идеальной скорости Чепмена — Жуге от коэффициента избытка горючего в камере сгорания ПДК-500 (ФГЗ):

1 — ФВ2, $\phi > 1$; 2 — ФВ1, $\phi < 1$; 3 — КС (ФВ2 с соплом)

$D_p/D_{CJ} > 1$ (кривая 2, $\phi < 1$), зарегистрированы впервые. Последнее означает, что на диаметре КС d_{c1} часть детонационного фронта BC является пересжатой волной, а скорость детонации Чепмена — Жуге достигается при диаметре $d_c < d_{c1}$. Увеличение скорости непрерывной спиновой детонации при истечении воздуха из форсунок по сравнению с истечением через щель можно объяснить лучшим перемешиванием горючей смеси в области вращения фронта BC (см. рис. 3) и формированием более регулярной вихревой структуры течения в этой области [31, 32]. На это, в частности, указывает и уменьшение в 1.5 раза размера детонационного фронта BC — 50 мм вместо 75 мм [25].

Пока не находит объяснения тот факт, что при изменении давления в КС (p_{c1}) в 10 ÷ 15 раз реализуется только одна ПДВ с примерно одинаковым размером детонационного фронта BC — около 5 см. Прекращение НСД на нижнем пределе по $p_{c1,min}$ происходит очень быстро — на одном обороте ПДВ без заметного переходного режима. Эта стабильность числа ПДВ и размера детонационного фронта не согласуется с положениями классической детонации топливных смесей в трубах [33] и кольцевых камерах детонационного горения [26], где одна поперечная волна реализуется вблизи пределов детонации. При повышении давления увеличивается число волн в многофронтовой детонации и ПДВ в режиме НСД, а также уменьшается размер поперечного детонационного фронта. По-видимому, причину надо искать в характере вихревого течения в КС, так как в камерах подобной геометрии при симметричной радиальной подаче окислителя всегда наблюдалось увеличение количества волн при увеличении давления в камере [20].

Характерная черта, по которой можно отличить на осциллограммах режим НСД от горения, ПД или холодного истечения, — увеличение перепада давления на форсунках (между давлениями в камере и в коллекторах горючего и воздуха). При этом давление в коллекторах возрастает, а в КС — уменьшается. Снижение давления в вихревой КС после развития НСД наблюдали при подаче воздуха через щель [25], а также при сжигании метана, водорода, угля [26], и оно было подтверждено расчетами по упрощенной модели потенциального вихря [15]. Причиной служило уменьшение центробежных сил продуктов реакции вследствие их меньшей плотности по сравнению с холодной смесью. В случае ПД, горения и холодного истечения этот перепад давления ничтожно мал и осциллограммы практически совпадают (см. рис. 7, б). Это означает, что при НСД камера сгорания работает в режиме эжекции — за фронтом детонационной волны BC в волне разрежения давление продуктов детонации p_1 уменьшается настолько, что оно становится намного ниже среднего ($p_{mid} \approx p_{c1}$) и создаются условия для критического истечения воздуха в КС (рис. 10). То есть ПДВ работает как всасывающий насос. Явление эжекции в режиме НСД наблюдали в камерах кольцевой цилиндрической геометрии [26], а также плоскорадиальной геометрии при истечении к периферии [34] при атмосферном давлении на входе и выходе из КС. Как правило, увеличение перепада давления на форсунках способствует увеличению расхода горючего и окислителя. Но в данной КС в режиме НСД увеличение перепада средних давлений на форсунках горючего и воздуха при увеличении давления в коллекторах приводило к снижению их расходов на 30 % и вдвое соответственно. Очевидно, что здесь

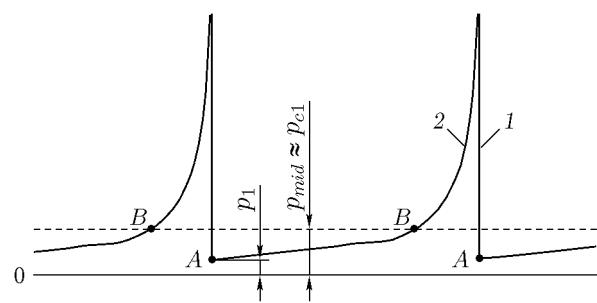


Рис. 10. Схема НСД в режиме эжекции:
1 — фронт ПДВ, 2 — волна разрежения

проявляется сильное влияние ПДВ на систему подачи топливных компонентов, которое преувеличивает над влиянием перепада давления на форсунках.

Необходимо отметить, что развитие НСД происходило лишь в половине экспериментов. В другой половине развивался режим с пульсирующими детонационными волнами, аналогичный режиму при присоединении к выходу КС цилиндра (см. рис. 6, 7). Отметим, что момент зарождения ПДВ наблюдали и при установке перегородок в выходное сопло, однако переход в режим НСД так и не состоялся. То есть проявлялось влияние пока неизвестного внутреннего фактора, который способствовал развитию НСД или ее подавлению. И если режим НСД развивался, то устойчиво существовал в диапазоне параметров, указанных выше.

ВЫВОДЫ

В вихревой плоскорадиальной камере диаметром 500 мм с одной конусной стенкой подтверждена возможность реализации непрерывной спиновой детонации при замене щели подачи воздуха форсункой с отдельными отверстиями и одинаковой суммарной площадью по-перечного сечения. Расширены пределы непрерывной спиновой детонации по минимальному давлению в камере сгорания и увеличены ее скорости, приближающиеся к скорости идеальной детонации Чепмена — Жуге и даже превышающие ее. Во всех случаях наблюдали одну поперечную детонационную волну, структура которой и течение в ее окрестности принципиально не отличались от наблюдавших ранее при подаче воздуха через щель. Установка сопла на выходе из камеры практически не влияла на параметры детонации. При установке цилиндра и препятствий на выходе из камеры (решетки) реализовывались только пульсирующие вдоль радиуса кольцевые детонационные волны с частотой $0.14 \div 0.26$ кГц. Обнаружено сильное влияние поперечных детонационных волн на систему подачи, особенно воздуха, расход которого снижался вдвое. Камера сгорания начинает работать в режиме эжекции. При детонации формируются большие тепловые потоки в стенки камеры сгорания с возможностью оплавления поверхности отверстий форсунки воздуха, что предъявляет к материалу форсунки дополнительные требования — иметь высокую теплопроводность или высокую температуру плавления, а также достаточно

большую площадь теплоотвода от поверхности отверстий.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) (раздел 2.3.1.2.4).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 129, № 6. — С. 1254–1256.
2. Войцеховский Б. В. Стационарная спиновая детонация // ПМТФ. — 1960. — № 3. — С. 157–164.
3. 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.
4. Wolański P. Detonative propulsion // Proc. Combust. Inst. — 2013. — V. 34, N 1. — P. 125–158. — DOI: 10.1016/j.proci.2012.10.005.
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. — EDN: RKZJTF.
6. Zhou R., Wu D., Wang J. Progress of continuously rotating detonation engines // Chin. J. Aeronaut. — 2016. — V. 29, N 1. — P. 15–29. — DOI: 10.1016/j.cja.2015.12.006.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

10. Frolov S. M., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Shamshin I. O. Continuous detonation combustion of ternary «hydrogen-liquid propane-air» mixture in annular combustor // Int. J. Hydrogen Energy. — 2017. — V. 42, N 26. — P. 16808–16820. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.138.
11. Wolański P. RDE research and development in Poland // Shock Waves. — 2021. — V. 31, N 7. — P. 623–636. — DOI: 10.1007/s00193-021-01038-2.
12. Фролов С. М., Иванов В. С., Шамшин И. О. и др. Детонационная форсажная камера сгорания // Докл. РАН. Физика, технич. науки. — 2020. — Т. 490, № 1. — С. 82–86. — DOI: 10.31857/S268674002001006X. — EDN: SJYYGK.
13. Фролов С. М., Иванов В. С., Шамшин И. О. и др. Форсажная камера с детонационным горением керосина // Горение и взрывы. — 2022. — Т. 15, № 1. — С. 67–71. — DOI: 10.30826/CE22150108. — EDN: VCWKPI.
14. Быковский Ф. А., Васильев А. А., Веденников Е. Ф., Митрофанов В. В. Детонационное горение газовой смеси в радиальных кольцевых камерах // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 4. — С. 111–118. — EDN: YHBJEJ.
15. Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Веденников Е. Ф. Непрерывное детонационное сжигание топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 3. — С. 120–131. — EDN: VXWGGK.
16. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Веденников Е. Ф., Жолобов Ю. А. Непрерывная и пульсирующая детонация угольно-воздушной смеси // Докл. АН. — 2010. — Т. 431, № 2. — С. 188–190. — EDN: LOKBZD.
17. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Веденников Е. Ф., Жолобов Ю. А. Детонация угольно-воздушной смеси с добавкой водорода в вихревых плоскорадиальных камерах // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 109–118. — EDN: OHSRAD.
18. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Веденников Е. Ф., Жолобов Ю. А. Детонационное сжигание каменного угля // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 2. — С. 89–94. — EDN: OXMNLV.
19. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Веденников Е. Ф., Жолобов Ю. А. Непрерывная спиновая детонация угольно-воздушной смеси в плоскорадиальной камере проточного типа // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 93–99. — EDN: RNKQEJ.
20. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Веденников Е. Ф., Самсонов А. Н., Зинцова А. С. Детонационное сжигание смеси водород — кислород в плоскорадиальной камере с истечением к центру // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 4. — С. 82–93. — DOI: 10.15372/FGV20160408. — EDN: WGCCQB.
21. Nakagami S., Matsuoka K., Kasahara J., Kumazawa Y., Fujii J., Matsuo A., Funaki I. Experimental visualization of the structure of rotating detonation waves in a disk-shaped combustor // J. Propul. Power. — 2017. — V. 33, N 1. — P. 80–88. — DOI: 10.2514/1.B36084.
22. Huff R., Polanka M. D., McClearn M. J., Schauer F. R., Fotia M. L., Hoke J. L. Design and operation of a radial rotating detonation engine // J. Propul. Power. — 2019. — V. 35, N 6. — P. 1143–1150. — DOI: 10.2514/1.B37578.
23. Xia Z., Ma H., Ge G., Zhou C. Visual experimental investigation on initiation process of H₂/air rotating detonation wave in plane-radial structure // Int. J. Hydrogen Energy. — 2020. — V. 45, N 53. — P. 29579–29593. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.07.257.
24. Xia Z., Zhang C., Wang F., He Y., Ma H., Ge G., Zhou C. Propagation characteristics of hydrogen-air rotating detonation wave in disk-shaped combustors with different configurations // Aerosp. Sci. Technol. — 2022. — V. 130. — 107806. — DOI: 10.1016/j.ast.2022.107806.
25. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Веденников Е. Ф. Непрерывная спиновая детонация смеси керосин — воздух в проточной вихревой радиальной камере диаметром 500 мм // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 1. — С. 40–52. — DOI: 10.15372/FGV20220104. — EDN: EKDHQU.
26. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
27. 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. — P. 235–243. — DOI: 10.1007/s00193-019-00919-x.
28. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. — М.: Энергия, 1974.
29. Неустойчивость горения в ЖРД / под ред. Д. Т. Харько, Ф. Г. Рирдона. — М.: Мир, 1975.
30. 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.
31. Быковский Ф. А., Веденников 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. — EDN: XUFTKP.
32. Быковский Ф. А., Веденников Е. Ф. Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 2. Вихревая структура течения // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 1. — С. 41–49. — EDN: OOBSKH.

33. **Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е.** Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
34. **Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F., Samsonov A. N., Popov E. L.** Detonation of a hydrogen-oxygen gas mixture in a plane-radial combustor with exhaustion toward the periphery in the regime of oxygen ejection // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — V. 1128. — 012075. — DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012075.

Поступила в редакцию 19.12.2022.

После доработки 10.01.2023.

Принята к публикации 01.02.2023.