

УДК 534.222.2,544.454.3

# НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ СМЕСИ ГАЗООБРАЗНЫЙ ВОДОРОД — ЖИДКИЙ КИСЛОРОД В ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ С ИСТЕЧЕНИЕМ К ПЕРИФЕРИИ

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

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

В плоскорadiaльной камере с истечением к периферии, с внутренним диаметром 100 мм и наружным 300 или 200 мм впервые реализованы режимы непрерывной спиновой и непрерывной многофронтной детонации газочапельной смеси газообразный водород — жидкий кислород. Высота детонационного фронта газочапельной смеси больше, чем газовой, что обусловлено критическим размером существования детонации. Центробежные силы, действующие на продукты за фронтом детонационной волны, способствуют более быстрому наполнению плоскорadiaльной камеры свежей смесью и увеличивают высоту детонационного фронта.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, непрерывная многофронтная детонация, газообразный водород, жидкий кислород, поперечные детонационные волны, плоскорadiaльная камера сгорания.

DOI 10.15372/FGV20200607

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время непрерывная спиновая детонация (НСД), непрерывная многофронтная детонация (НМД), а также пульсирующая продольная детонация в камерах плоскорadiaльной геометрии с истечением к периферии изучалась только для газовых топливно-кислородных смесей, в том числе с водородом в качестве горючего [1–9]. Однако в ракетной технике используются в качестве компонентов топлива жидкие водород и кислород. Поскольку критическое состояние водорода достигается при температуре  $T^* = 33.24$  К и давлении  $p^* = 1.3$  МПа, а кислорода — при  $T^* = 154.78$  К и  $p^* = 5.08$  МПа [10], в камеру сгорания (КС) водород поступает, как правило, в газообразном состоянии, а кислород — как в газообразном, так и в жидком состоянии в зависимости условий в системе подачи и давления в КС. Ранее опыты по детонационному сжиганию смеси водорода с жидким кислородом были проведены в камере кольцевой цилиндрической геометрии [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-41-540001p\_a).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Самсонов А. Н., Попов Е. Л., 2020.

Цель данной работы — реализация и исследование структуры детонационных волн в потоках газообразного водорода и жидкого кислорода в плоскорadiaльной камере (ПРК) с истечением к периферии с внутренним диаметром  $d_{c1} = 100$  мм.

## 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили в ПРК 1 с истечением к периферии с внутренним диаметром  $d_{c1} = 100$  мм (рис. 1). Расстояние между плоскими стенками составляло  $\Delta = 10$  мм, а

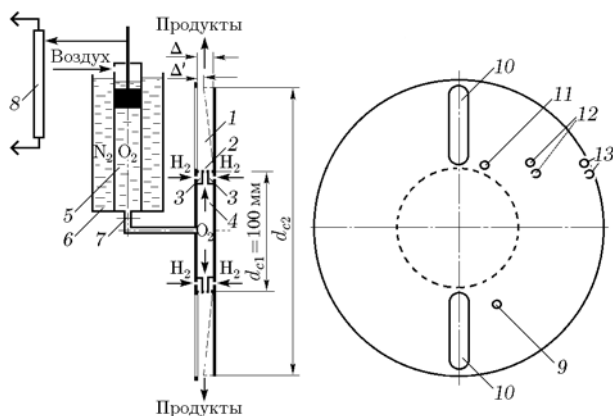


Рис. 1. Схема плоскорadiaльной КС с истечением к периферии

наружный диаметр кольцевого отверстия, через которое происходило истечение продуктов, варьировался —  $d_{c2} = 300$  или  $200$  мм. Поэтому изменялась длина КС  $L_c = (d_{c2} - d_{c1})/2$ . Особенностью ПРК является то, что расстояние между плоскими стенками намного меньше ее диаметров:  $\Delta \ll d_{c1} < d_{c2}$ . Ряд опытов проводили при равномерном заужении канала к выходу из ПРК, обеспечивающем примерное постоянство площади кругового сечения канала  $S_\Delta \approx 31.4 \text{ см}^2 = \text{const}$ : при  $d_{c2} = 300$  мм — от  $\Delta = 10$  мм до  $\Delta' = 3.3$  мм, при  $d_{c2} = 200$  мм — от  $\Delta = 10$  мм до  $\Delta' = 5$  мм. В случае конусной боковой стенки точное равенство площадей соблюдено только на входе и выходе канала КС. Внутри него вначале происходит некоторое расширение площади проходного сечения, а затем его сужение. Раздельная подача водорода и кислорода в ПРК в направлении к периферии осуществлялась через отверстия 2, равномерно расположенные по окружности на цилиндрической стенке и создающие систему сталкивающихся струй, обеспечивающих перемешивание компонентов вблизи этой стенки. Общая площадь сечения отверстий для водорода составляла  $S_f = 45.6 \text{ мм}^2$ , кислорода —  $S_{ox} = 30.4 \text{ мм}^2$ . Водород в ПРК поступал из ресивера объемом  $V_{r,f} = 13.5$  л через коллекторы 3, кислород — через коллектор 4 из расходомера 5 путем вытеснения поршнем, движущимся под действием давления воздуха, находящегося в ресивере объемом  $V_{r,a} = 4.2$  л (ресиверы на рисунке не показаны). Для предотвращения вскипания кислорода расходомер помещался в емкость с жидким азотом 6, а поршень утапливался в кислород. Жидкий кислород отделялся от камеры диафрагмой 7 из тонкой алюминиевой фольги. Начальное давление в ресиверах: для водорода —  $p_{r,f0} = 55 \cdot 10^5$  Па, воздуха —  $p_{r,ox0} = (22 \div 50) \cdot 10^5$  Па. Начальный расход водорода составлял  $G_{f0} = 0.11$  кг/с, а расход кислорода изменялся в диапазоне  $G_{ox0} = 0.186 \div 1.35$  кг/с. При открытии клапанов воздуха, вытесняющего жидкий кислород, его давление уменьшалось на одну треть, так как происходило заполнение воздухом подводящих трубопроводов и пространства расходомера над поршнем. Текущие расходы водорода определяли по уменьшению давления в ресивере  $p_{r,f}$ , кислорода — по ходу поршня  $L_p$ , регистрируемого реостатом 8 [4]. Удельный расход смеси составлял  $g_\Sigma = (G_f + G_{ox})/S_\Delta =$

$20 \div 230 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ , коэффициент избытка горючего  $\phi = (G_f/G_{ox})\chi_{st} = 0.6 \div 2.9$ . Здесь  $S_\Delta = \pi d_{c1} \Delta$  — площадь цилиндрической поверхности ПРК на входе,  $\chi_{st} = 8$  — стехиометрический коэффициент. Инициатор процесса 9 устанавливался в плоской стенке на расстоянии 20 мм от входа в ПРК. Он содержал полоску алюминиевой фольги, пережигаемую электротокком с выделением энергии около 5 Дж. Запуск схемы иницирования был синхронизован с поступлением в камеру кислорода, который подавался позже водорода. Продукты истекали в атмосферу с давлением  $p_a = 1.0 \cdot 10^5$  Па. Для наблюдения процесса в одной из плоских стенок ПРК вдоль радиуса установлены два окна 10 из оргстекла длиной 95 мм и шириной 10 мм, охватывающие практически все поле течения вдоль окна. Лишь небольшая область течения вблизи форсунок на расстоянии 5 мм исключалась из наблюдения.

Процесс в ПРК фотографировался высокоскоростной камерой Photron Fastcam SA5 с частотой 700 000 кадр/с. Обработкой кадров по специальной программе получали развертку картины течения в системе волны. Поскольку фоторазвертка имела линейную форму, светящиеся объекты, движущиеся в тангенциальном направлении, фиксировались с искажением, так как они двигались по окружностям разного диаметра. Для преобразования фоторазверток в кольцо использовалась специальная программа. По фоторегистрограммам определялось время появления детонационных волн против окна  $\Delta t$ , которое позволяло однозначно находить их частоту  $f = 1/\Delta t$ . При НСД рассчитывалась и скорость движения поперечных детонационных волн (ПДВ)  $D$  относительно цилиндрической поверхности диаметром  $d_{c1}$ :  $D = \pi d_{c1}/(n\Delta t)$ . Здесь  $n$  — число ПДВ вдоль окружности камеры.

Измерялось среднее текущее давление: в ресиверах водорода  $p_{r,f}$  и воздуха  $p_{r,ox}$ , соответствующих коллекторах  $p_{m,f}$  и  $p_{m,ox}$ , статическое в камере  $p_{c1}$  на расстоянии 10 мм от цилиндрической поверхности ПРК (поз. 11), статическое  $p_{c2}$  и полное  $p_{c20}$  (с помощью трубок Пито) на расстоянии 50 мм от цилиндрической поверхности ПРК (поз. 12), статическое  $p_{c3}$  и полное  $p_{c30}$  на расстоянии 100 мм от этой поверхности (поз. 13). Датчики 12 и 13 измеряли давление на выходе из камеры длиной  $L_c = 50$  и 100 мм соответственно. Измерение давления проводилось сертифицированными датчиками

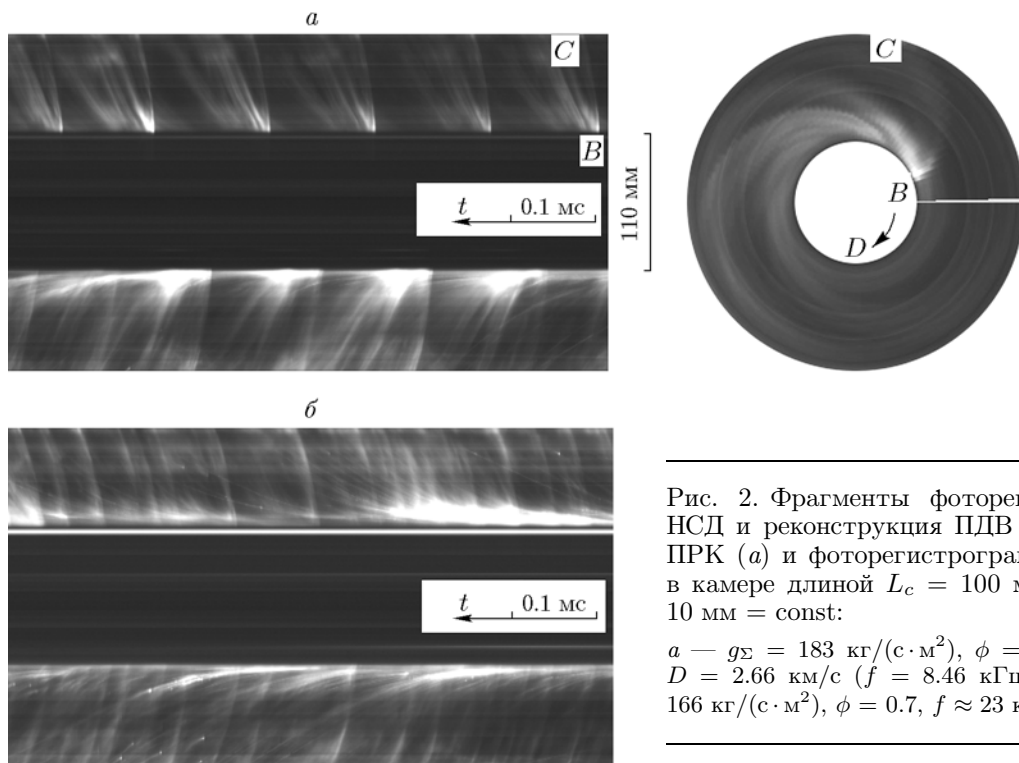


Рис. 2. Фрагменты фоторегистрограмм НСД и реконструкция ПДВ в плоскости ПРК (а) и фоторегистрограмм НМД (б) в камере длиной  $L_c = 100$  мм при  $\Delta = 10$  мм = const:

а —  $g_\Sigma = 183$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 0.87$ ,  $n = 1$ ,  $D = 2.66$  км/с ( $f = 8.46$  кГц); б —  $g_\Sigma = 166$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 0.7$ ,  $f \approx 23$  кГц

фирмы «Trafag» (Швейцария) с классом точности 0.5 %.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 2.1. Камера сгорания диаметром $d_{c2} = 300$ мм

ПРК с  $\Delta = 10$  мм = const. В диапазонах удельных расходов горючей смеси  $g_\Sigma = 180 \div 230$  кг/(с·м<sup>2</sup>), коэффициентов избытка горючего  $\phi = 0.86 \div 1.29$  и давления в камере  $p_{c1} = (2.1 \div 3.2) \cdot 10^5$  Па реализована НСД с одной ( $n = 1$ ) ПДВ. Относительно внутренней цилиндрической поверхности камеры она двигалась со скоростями  $D = 2.4 \div 3.58$  км/с ( $f = 7.64 \div 11.4$  кГц). На рис. 2, а приведен фрагмент фоторегистрограммы НСД с одной ПДВ и ее реконструкция в плоскости камеры.

Фоторегистрограммы, снятые через верхнее и нижнее окна (см. рис. 1, поз. 10), разделены темной полосой размером 110 мм, отображающей пространство между окнами. Детонационный фронт  $BC$  движется слева направо с фазовой, достаточно высокой скоростью  $D$ . Истинная скорость волны определяется нормально к фронту  $BC$ , который все более отклоняется назад с увеличением радиуса канала ПРК (иначе не объяснить утроенные скорости на периферии камеры с диаметром отверстия  $d_{c2} =$

300 мм). Фронт детонационной волны  $BC$  занимает всю длину камеры  $h \approx L_c = 100$  мм. Шлейф  $CD$  (ударная волна, примыкающая к фронту) уходит за пределы камеры, поэтому на фоторегистрограммах не виден. На фоторегистрограмме фиксируется одинаковое направление движения ПДВ в верхнем и нижнем окнах. Ясно, что в окнах волна перемещается в противоположных направлениях. Истинное направление ПДВ можно определить при просмотре фильма. По отчетливости изображения волны определялось направление сканирования объекта видеокамерой. Если оно совпадало с направлением движения волны и осуществляло некоторую компенсацию скорости волны, то фиксировалось более отчетливое изображение (верхняя дорожка), если не совпадало — размытие ее структуры (нижняя дорожка).

В диапазонах  $g_\Sigma = 151 \div 180$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 0.6 \div 0.86$  и  $p_{c1} = (1.6 \div 2.1) \cdot 10^5$  Па наблюдали режим НМД со встречными ПДВ (рис. 2, б). Процесс очень нерегулярный по скорости и структуре ПДВ. Даже количество ПДВ в нем определить затруднительно, а их расположение в плоскости камеры по фоторегистрограмме, снятой через продольные окна 10, изобразить невозможно. Для этого нужно де-

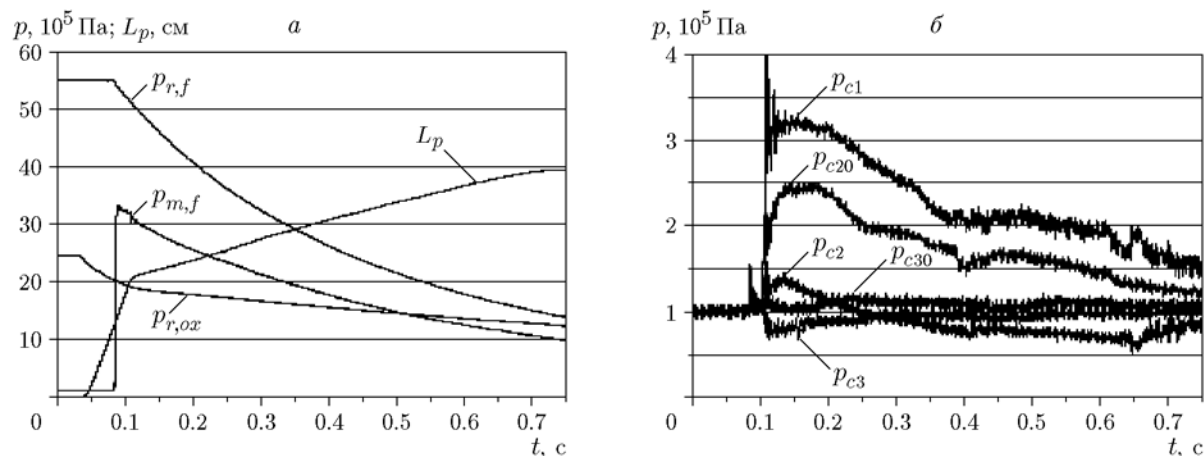


Рис. 3. Осциллограммы давления и хода поршня в системе подачи (а) и в КС (б) в камере длиной  $L_c = 100$  мм при  $\Delta = 10$  мм = const

лать покадровую съемку через всю прозрачную стенку камеры, которая была выполнена, например, в ПРК с истечением к центру [6]. Осциллограммы процесса, фрагменты которого представлены на рис. 2, приведены на рис. 3.

Начало отсчета времени  $t$  фиксирует запуск управления клапанов системы подачи, инициирования и регистрирующей аппаратуры. Первым открывается клапан, подающий воздух под давлением  $p_{r,ox}$  на поршень расходомера жидкого кислорода (см. рис. 1, поз. 5). Мембрана 7 прорывается, и поршень начинает перемещаться (кривая  $L_p$ ). Резкий перелом в ходе кривой  $L_p$  соответствует полному вытеснению воздуха из коллектора кислорода 4 и заполнению его жидким кислородом. Дальнейший ход поршня регистрирует вытеснение в КС жидкого кислорода. Второй перелом кривой  $L_p$  соответствует остановке поршня в нижней точке расходомера 5, после чего начинается вытеснение воздухом жидкого кислорода, оставшегося в коллекторе 4. Вторым открывается клапан, подающий водород под давлением  $p_{r,f}$ , который вытекает из ресивера. В момент инициирования происходит резкий подъем давления в КС (см. рис. 3, б). Поскольку истечение водорода происходило из конечного объема  $V_{r,f}$ , его расход уменьшался в течение эксперимента. В то же время поршень, вытесняющий жидкий кислород из расходомера, двигался практически с постоянной скоростью. Поэтому в течение опыта уменьшались как коэффициент избытка горючего  $\phi = 1.55 \rightarrow 0.7$ , так и давление в КС. Из соотношений полных и статических давлений на середине камеры

$p_{c20}/p_{c2}$  и на выходе из нее  $p_{c30}/p_{c3}$  следует, что истечение продуктов из камеры докритическое, а скачок давления доходит до середины камеры только в конце опыта. Основные параметры режима представлены в первой строке таблицы. Здесь  $p_a \approx 1 \cdot 10^5$  Па — давление окружающей среды, а стрелки в обозначении диапазонов указывают направление изменения параметров в течение эксперимента. Вследствие неравномерности скорости перемещения поршня в некоторых опытах параметры, входящие в таблицу, выходили за пределы указанных максимальных и минимальных значений.

**ПРК с  $S_\Delta \approx \text{const}$ .** При заужении канала ПРК от  $\Delta = 10$  до  $\Delta' = 3.3$  мм (см. рис. 1) в диапазонах  $g_\Sigma = 90.9 \div 93.4$  кг/(с · м<sup>2</sup>),  $\phi = 2.9 \div 4.38$  и  $p_{c1} = (4.1 \div 4.64) \cdot 10^5$  Па в КС развивалось обычное горение, связанное с неустойчивостью поступления кислорода в камеру (рис. 4, а). Здесь запечатлены развертки движения частиц продуктов сгорания, движущихся в радиальном направлении ( $x-t$  диаграмма). На фоне горения просматриваются слабые акустические волны, движущиеся в тангенциальном направлении.

При стабилизации поступления кислорода в КС ( $t > 0.23$  с) в диапазонах  $g_\Sigma = 20 \div 122$  кг/(с · м<sup>2</sup>),  $\phi = 1.09 \div 2.9$  и  $p_{c1} = (1.7 \div 3.7) \cdot 10^5$  Па наблюдался режим НСД. Смесь сжигалась во фронте ВС в большем количестве ПДВ ( $n = 3 \div 6$ ) при скоростях относительно внутренней цилиндрической поверхности  $D = 2.42 \div 2.86$  км/с ( $f = 30.8 \div 54.6$  кГц). На рис. 4, б показаны фрагмент

Параметры процессов в камерах длиной  $L_c = 100$  и  $50$  мм

$L_c$ , мм	$g_{\Sigma}$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	$\phi$	$f$ , кГц	$n$	$D$ , км/с	$p_{c1}/p_a$	Режим
100 ( $\Delta = 10$ мм)	230 → 180 180 → 151	1.29 → 0.87 0.87 → 0.6	11.2 → 8.46 24.6 → 23	1 —	3.56 → 2.65 —	3.1 → 2.1 2.1 → 1.5	НСД НМД
100 ( $\Delta' = 3.3$ мм)	122 → 20	2.9 → 1.09	54.6 → 30.8	6 → 3	2.86 → 2.42	3.7 → 1.7	НСД
50 ( $\Delta = 10$ мм)	165 → 128 128 → 86 86 → 83	1.88 → 1.8 1.8 → 1.43 1.43 → 1.0	9.91 → 9.24 — 24 → 19.9	1 — 3 → 4	3.11 → 2.9 — 2.55 → 1.56	3.8 → 2.2 2.2 → 2.0 2.0 → 1.8	НСД Неустойчивые ПДВ НСД
50 ( $\Delta' = 5$ мм)	284 → 136 136 → 82	0.99 → 1.03 1.03 → 0.9	— 83.3 → 48.2	— 10 → 7	— 2.61 → 2.16	6.1 → 2.5 2.3 → 1.52	Горение НСД

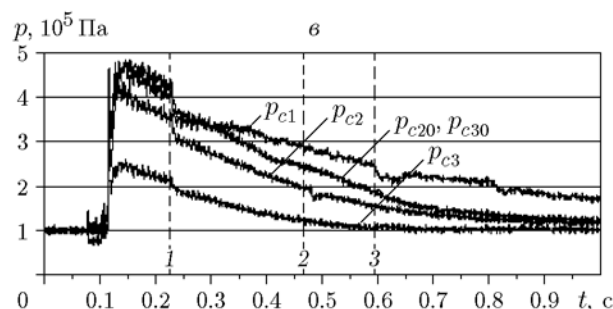
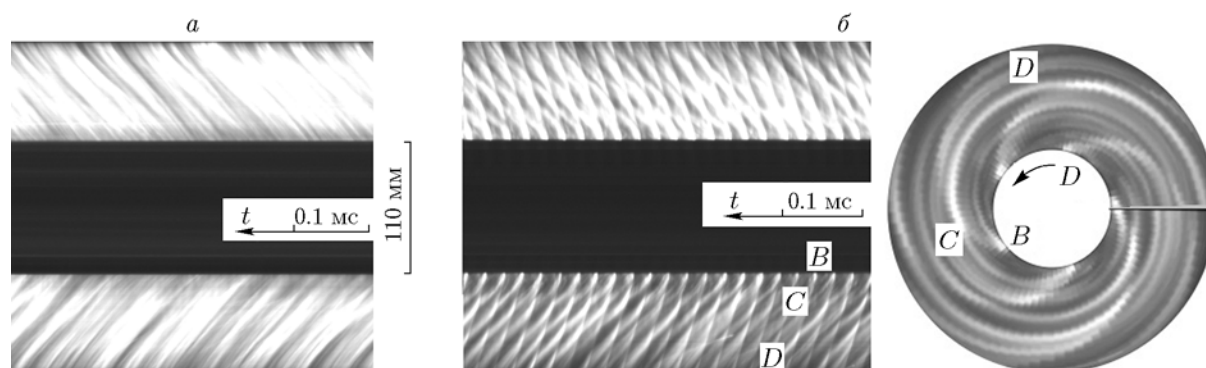


Рис. 4. Фрагменты фоторегистрограмм (а, б) и осциллограмма давления (в) в ПРК длиной  $L_c = 100$  мм и  $S_{\Delta} \approx \text{const}$ :

а — горение,  $g_{\Sigma} = 93$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 3$ ; б — процесс НСД и реконструкция ПДВ в плоскости ПРК,  $g_{\Sigma} = 116$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 1.33$ ,  $n = 5$ ,  $D = 2.614$  км/с ( $f = 41.6$  кГц); 1, 2 и 3 — моменты времени, соответствующие горению (а), НСД (б) и началу докритического истечения из КС

фоторегистрограммы НСД с пятью ПДВ и их реконструкция в плоскости камеры.

На рис. 4, в представлены осциллограммы давления внутри КС. Видно, что давление в камере существенно выше, чем в опыте с  $\Delta = 10$  мм = const (см. рис. 3, б). При этом значения полного давления в середине и на выходе из КС практически совпадают:  $p_{c20} \approx p_{c30}$ . Скачкообразное изменение давления в камере ( $t \approx 0.23$  с) связано с неустойчивой подачей жидкого кислорода, зафиксированной ходом поршня расходомера  $L_p$ . Результаты опыта приведены в таблице. Однако, ввиду неравномерности хода поршня, вытесняющего кислород из расходомера, в течение опыта происходили скачки

удельного расхода смеси в пределах  $\pm 5\%$ , что не повлияло заметно на режим НСД.

## 2.2. Камера сгорания диаметром $d_{c2} = 200$ мм

ПРК с  $\Delta = 10$  мм = const. В диапазонах  $g_{\Sigma} = 128 \div 165$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 1.8 \div 1.88$  и  $p_{c1} = (2.2 \div 3.8) \cdot 10^5$  Па реализован устойчивый режим НСД с одной ПДВ (рис. 5, а). Помимо фрагмента фоторегистрограммы, справа на рис. 5 показано размещение ПДВ и течение в ее окрестности в плоскости ПРК. Длины камеры  $L_c = 50$  мм оказалось недостаточно, чтобы в детонационной волне сжигать образующуюся в КС смесь. Поэтому на рис. 5, а отмечена только верхняя точка волны В, а нижняя точка

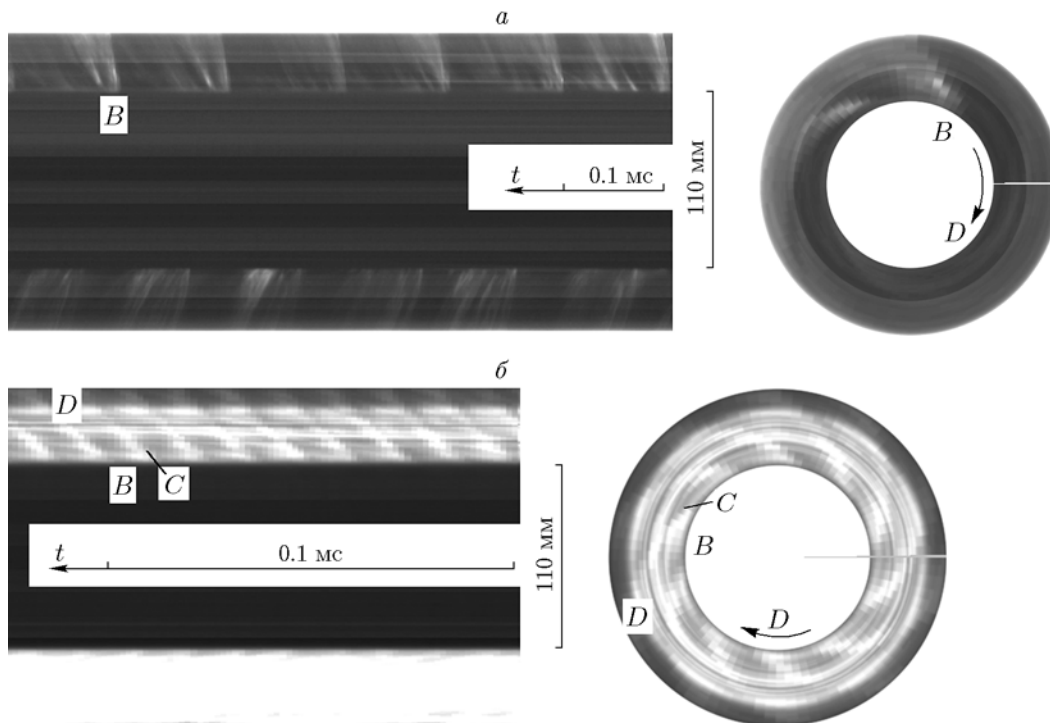


Рис. 5. Фрагменты фоторегистрограмм и реконструкция ПДВ в ПРК длиной  $L_c = 50$  мм: *a* —  $\Delta = 10$  мм = const,  $g_\Sigma = 168$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 1.56$ ,  $n = 1$ ,  $D = 2.93$  км/с ( $f = 9.32$  кГц); *б* —  $S_\Delta \approx$  const,  $g_\Sigma = 135$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 1.04$ ,  $n = 10$ ,  $D = 2.61$  км/с ( $f = 83.3$  кГц)

*C* и шлейф *CD* находятся за пределами ПРК. Относительно внутренней цилиндрической поверхности камеры ПДВ двигалась со скоростями  $D = 2.9 \div 3.11$  км/с ( $f = 9.24 \div 9.91$  кГц). В диапазонах  $g_\Sigma = 86 \div 128$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 1.43 \div 1.8$  и  $p_{c1} = (2.0 \div 2.2) \cdot 10^5$  Па наступила неустойчивость режима НСД с нерегулярными ПДВ, число которых изменялось ( $n = 2 \leftrightarrow 4$ ). Режим восстановил регулярность при  $g_\Sigma = 83 \div 86$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 1.0 \div 1.43$  и  $p_{c1} = (1.8 \div 2.0) \cdot 10^5$  Па. Сначала установились три ПДВ, вращающиеся со скоростью  $D = 2.32 \div 2.55$  км/с ( $f = 22.2 \div 24.0$  кГц), а затем — четыре в диапазоне скоростей  $D = 1.56 \div 1.624$  км/с (см. третью строку в таблице).

**ПРК с  $S_\Delta \approx$  const.** При заужении канала ПРК от  $\Delta = 10$  до  $\Delta' = 5$  мм (см. рис. 1) в диапазонах  $g_\Sigma = 136 \div 284$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 0.99 \div 1.03$  и  $p_{c1} = (2.5 \div 6.1) \cdot 10^5$  Па в ПРК развивалось обычное горение, аналогичное зафиксированному на фоторегистрограмме рис. 4,а. Горение перешло в режим НСД с большим количеством ПДВ ( $n = 10 \rightarrow 7$ ) при  $g_\Sigma = 82 \div 136$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi = 0.9 \div 1.03$  и  $p_{c1} = (1.55 \div 2.3) \cdot 10^5$  Па (см. четвертую стро-

ку в таблице). Фрагмент фоторегистрограммы, включающей в себя ПДВ, вращающиеся в плоскости ПРК, приведен на рис. 5,б слева, а справа — его реконструкция в кольцо. Здесь точка *C*, обозначающая нижний край детонационного фронта *BC*, вынесена за пределы кольцевого зазора *КС*.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ПРК с истечением к периферии впервые реализовано детонационное сжигание смесей газообразный водород — жидкий кислород как в режиме НСД, так и НМД. Ранее эти режимы были осуществлены в данной КС при сжигании газовых смесей водород — кислород [8, 9]. Поскольку детонационный фронт *BC* искривлен и сильно отклоняется в направлении движения исходной смеси (в системе волны), то при анализе выбирали его проекцию на радиус камеры, которую обозначали *h*. В ПРК длиной  $L_c = 100$  мм при  $\Delta = 10$  мм = const зарегистрированы  $h \approx L_c = 100$  мм и отношение  $h/l \approx 1/3$ , где *l* — расстояние между смежными ПДВ (при  $n = 1$  это длина окружности внутренней цилиндрической поверхности камеры). В ПРК с

$L_c = 50$  мм во фронт ПДВ внутри кольцевого канала попадает меньше половины натекающей свежей смеси. Естественно, что для реализации оптимального режима НСД в диапазонах удельных расходов смеси, указанных выше, длина каналов должна быть увеличена минимум до  $(2 \div 2.5)h$  ( $L_{c,\min} = 200, 250$  мм).

В ПРК длиной  $L_c = 100$  и  $50$  мм при  $S_\Delta \approx \text{const}$  в указанных диапазонах удельных расходов высота фронта  $BC$  составляет  $h \approx 25$  мм (отношение  $h/l \approx 1/2.5$ ) и  $h \approx 10$  мм (отношение  $h/l \approx 1/3$ ) соответственно. Тогда эти камеры при соблюдении условия  $L_{c,\min} = (2 \div 2.5)h$  могут быть уменьшены в  $2 \div 3$  раза. Пока остается открытым вопрос, почему при близких расходах смесей число ПДВ в этих камерах отличается вдвое. Небольшая разница в коэффициентах избытка горючего не должна существенно отразиться на количестве волн. В ПРК с  $S_\Delta \approx \text{const}$  и  $L_c = 100$  мм на газовых компонентах водород — кислород при  $g_\Sigma = 116$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и  $\phi \approx 1.0$  сжигание смеси также происходило в пяти ПДВ, однако их скорость и частота были гораздо меньше —  $D = 2.06$  км/с,  $f = 32.8$  кГц [9]. Высота детонационного фронта составляла  $h \approx 15$  мм, а отношение  $h/l \approx 1/4$ . Меньшая высота фронта ПДВ при газовой детонации обусловлена меньшим критическим слоем смеси для детонации по сравнению с газок капельной смесью этих компонентов. В кольцевой цилиндрической КС диаметром  $d_c = 100$  мм с площадью поверхности на входе  $S_\Delta \approx \text{const}$  при НСД компонентов газообразный водород — жидкий кислород и близких удельных расходах наблюдались три волны, движущиеся со скоростью  $D = 2.42$  км/с ( $f = 23.1$  кГц) [4]. Однако высота фронта составляла  $h \approx 10$  мм, а отношение  $h/l \approx 1/10$ . Уменьшение высоты фронта по сравнению с его величиной в ПРК связано с отсутствием влияния на продукты центробежных сил, действующих вдоль канала камеры.

Как и следовало ожидать, при нестационарном тепловом режиме истечения криогенной жидкости реальные расходы кислорода оказались меньше, чем по оценкам без учета влияния испарения в тракте подачи, включающем в себя трубопровод после мембраны 7, коллектор 4 и форсунки 2 (см. рис. 1). Очевидно, что доля газообразного кислорода возрастает с увеличением времени соприкосновения жидкой фазы с поверхностью тракта подачи, а также с увеличением площади этой поверхности. Дей-

ствительно, при большем давлении подачи кислорода это время уменьшалось и выход жидкой фазы кислорода увеличивался. Например, при давлении подачи воздуха  $p_{r,ox} = 37 \cdot 10^5$  Па расход кислорода составлял  $G_{ox} = 1.35$  кг/с, а при  $p_{r,ox} = 18 \cdot 10^5$  Па —  $G_{ox} = 0.51$  кг/с. По оценке расхода кислорода без учета его испарения по формуле  $G_{ox} = \mu \rho_{ox} v_{ox} S_{ox}$  получаем  $G_{ox} = 2.18$  и  $1.53$  кг/с, что превышает истинный расход в 1.61 и 3 раза соответственно. Здесь  $\mu = 0.875$  — коэффициент расхода в каналах форсунки с острыми входами [11],  $\rho_{ox} = 1.2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> — плотность жидкого кислорода при температуре кипения азота  $T_h = 77$  К [12],  $v_{ox} = (2\Delta p / \rho_{ox})^{0.5}$  — скорость истечения кислорода при перепаде давления на отверстиях форсунки  $\Delta p = p_{m,ox} - p_{st}$ , где  $p_{st}$  — статическое давление в КС на выходе из форсунок. Следует отметить, что давление в коллекторе кислорода  $p_{m,ox}$  не удалось достоверно измерить, так как жидкий кислород, попадая в подводную к датчику трубку, начинал испаряться и показания датчика превышали давление вытесняющего воздуха в ресивере  $p_{r,ox}$ . При истечении газообразного кислорода через отверстия форсунки давление в коллекторе отличалось от давления в ресивере не более чем на 10 % [8, 9]. Учитывая, что площадь отверстий форсунки для жидкого кислорода была в два раза меньше площади отверстий форсунки для газа, а скорость истечения жидкой фазы примерно в пять раз меньше при давлении подачи  $p_{r,ox} = 25 \cdot 10^5$  Па ( $v_{ox} \approx 60$  м/с), можно утверждать, что в предположении  $p_{m,ox} \approx p_{r,ox}$  ошибка определения скорости жидкой фазы не превышает 2.5 %. Разницей статических давлений на выходе форсунки и на расстоянии 10 мм можно пренебречь, так как она находится в пределах  $1 \cdot 10^5$  Па (см. рис. 3, 4). Установка в тракт подачи кислорода препятствий (гайки М16) увеличивала площадь контакта жидкого кислорода с металлом, находящимся вначале при комнатной температуре, и повышала содержание газовой фазы.

Оценим возможности нагрева жидкого кислорода от стенок тракта подачи. Характерная толщина охлаждения стенок тракта подачи  $\delta_w$  оценивается величиной  $\delta_w = (a_w t)^{0.5}$ , где  $a_w = \lambda_w / (\rho_w c_w)$  — температуропроводность материала стенок,  $\lambda_w$ ,  $\rho_w$ ,  $c_w$  — его теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость соответственно. Для оценок воспользуемся средними значениями констант в про-

межутке температур  $T_{0w} \div T_h$ , где  $T_{0w} = 296$  К — начальная температура стенок тракта подачи кислорода,  $T_h$  — температура кипения кислорода, соответствующая давлению  $p_{r,ox}$ . Ограничимся одним примером, когда в тракте подачи с площадью стенок  $S_w = 250$  см<sup>2</sup> при давлении подачи кислорода  $p_{r,ox} = 30 \cdot 10^5$  Па температура кипения кислорода равна  $T_h = 141.5$  К. Для нержавеющей стали средние значения констант будут [10]:  $\lambda_w = \langle \lambda_w \rangle \approx 28.8$  Дж/(м·с·К),  $\rho_w = \langle \rho_w \rangle \approx 8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_w = \langle c_w \rangle \approx 376$  Дж/(кг·К). Тогда  $a_w = 9.57 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, и за время истечения  $t = 0.6$  с получаем  $\delta_w = 2.4$  мм. Отданное стенками тракта подачи тепло  $Q_w$  оценивается величиной  $Q_w = m_w c_w (T_{0w} - T_h) = \rho_w S_w \delta_w c_w (T_{0w} - T_h) = 47.5$  кДж. Этого количества тепла достаточно, чтобы нагреть массу кислорода  $m_{ox} = Q_w / [J_h + (J_{ox(l)2} - J_{ox(l)1})] \approx 0.1$  кг до температуры кипения. Здесь  $J_h = 378$  кДж/кг — теплота парообразования при температуре кипения  $T_h = 141.5$  К,  $J_{ox(l)1} = -155$  кДж/кг и  $J_{ox(l)2} = -24$  кДж/кг — энтальпия жидкого кислорода при  $T_{0ox} = 77$  К и  $T_h = 141.5$  К соответственно. В расходомер обычно заливалось  $\approx 0.5$  кг жидкого кислорода, поэтому его газификация с плотностью паров  $\rho_{ox,h} \approx 0.1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> при  $T_h = 141.5$  К вполне могла снижать расчетные расходы кислорода до трех раз и более.

Было замечено, что скорость движения поршня (расход кислорода  $G_{ox}$ ) часто отличалась при одном и том же давлении подачи  $p_{r,ox}$ , особенно при малых его значениях. По-видимому, это связано с формированием первичной детонационной волны в ПРК, распространяющейся от точки инициирования по заполнившей камеру топливной смеси. При этом неизбежно происходил заброс продуктов в коллектор кислорода, в контакте с которыми кислород частично испарялся. Скорость его истечения уменьшалась, а иногда столб жидкости в расходомере начинал двигаться в обратную сторону. Время контакта кислорода со стенками увеличивалось, что приводило к дополнительной газификации. В результате формировался режим истечения газожидкостной системы кислорода, зависящий от первоначальной степени воздействия первичной детонационной волны на систему подачи.

В ПРК с  $\Delta = 10$  мм = const в указанных выше пределах по удельному расходу топливной смеси всегда устанавливалась непрерыв-

ная детонация: в камере  $L_c = 100$  мм — НСД или НМД, а в камере  $L_c = 50$  мм — только НСД. Причем в камере  $L_c = 100$  мм НМД наблюдалась практически в том же диапазоне расходов  $g_\Sigma = 151 \div 180$  кг/(с·м<sup>2</sup>), что и в опытах с газообразными водородом и кислородом [8, 9]. То есть для этой КС определяющим фактором является геометрия камеры, а смесеобразование играет второстепенную роль. Заужение зазора камеры до  $\Delta' = 3.3$  мм ( $S_\Delta \approx \text{const}$ ) привело к существованию режима НСД (как и в работах [8, 9]). Лишь наблюдающееся в начале опыта горение можно отнести к колебаниям поршня расходомера около начального положения и нерасчетного режима вытеснения кислорода в КС. Остались невыясненными типы режимов при больших удельных расходах топлива  $g_\Sigma > 122$  кг/(с·м<sup>2</sup>). По-видимому, там тоже реализовывался режим горения, который наблюдали в КС  $L_c = 50$  мм с заужением канала.

В камере длиной  $L_c = 50$  мм при  $\Delta = 10$  мм = const для реализации НСД существенно смесеобразование по длине камеры, так как половина смеси выбрасывается наружу и там догорает в детонационной волне за пределами КС. По какой-то причине здесь не создаются условия для существования НМД. На газовых компонентах [8, 9] детонационный фронт занимает в КС примерно одну треть ее длины ( $h \approx (1/3)L_c$ ), поэтому создавались условия для реализации как НСД, так и НМД. При  $\Delta' = 5$  мм ( $S_\Delta \approx \text{const}$ ) и  $g_\Sigma > 136$  кг/(с·м<sup>2</sup>) наблюдали обычное горение, хотя соотношение компонентов топлива было благоприятным. И лишь при  $g_\Sigma < 136$  кг/(с·м<sup>2</sup>) произошел переход к НСД, причем с большим количеством ПДВ ( $n = 10$ ) и малой высотой фронта ( $h \approx 10$  мм). Сравнительные оценочные (без учета паровой фазы) и действительные расходы кислорода, обнаружили, что НСД наблюдается при содержании газообразной фазы кислорода более 70 %. Таким образом, при меньших концентрациях газообразного кислорода струи водорода не успевают разбить струи и капли кислорода на расстоянии  $h \approx 10$  мм от форсунок и образующаяся смесь начинает выгорать по механизму обычного горения. При содержании газообразного кислорода более 70 % образуется детонационно-способный слой смеси газообразных кислорода и водорода и реализуется НСД, во фронтах которой дробятся оставшиеся капли кислорода и дожигают водород. В связи с этим целесообраз-



но подавать кислород в КС в сверхкритическом состоянии, когда при разгрузке по давлению и попадании в среду с высокой температурой он весь превращается в газовую фазу. При  $\Delta = 10$  мм = const горючая смесь образовывалась в расширяющейся по площади сечения КС, пламя не удерживалось у форсунок, поэтому детонационноспособный слой смеси формировался на большем расстоянии от форсунок без выгорания перед фронтом детонационной волны.

## ВЫВОДЫ

1. В плоскорадиальной камере с истечением к периферии и внутренним диаметром 100 мм и наружным 300 мм впервые реализованы режимы непрерывной спиновой и непрерывной многофронтной детонации в газокпельной смеси газообразный водород — жидкий кислород. В камере с наружным диаметром 200 мм получены режимы непрерывной спиновой детонации.

2. Рассмотрена структура детонационных волн. Для непрерывной спиновой детонации проведена реконструкция поперечных детонационных волн и течения в их окрестности в плоскости камеры. Показано, что детонационная волна сильно искривлена вследствие возрастания тангенциальной составляющей скорости вдоль радиуса камеры.

3. Показано, что в камере плоскорадиальной геометрии с истечением к периферии из-за наличия центробежных сил, действующих на продукты во фронте детонационной волны, а также в волне разрежения, увеличивается высота детонационноспособного слоя смеси, вследствие чего уменьшается отношение высоты этого слоя к расстоянию между смежными поперечными детонационными волнами.

4. Проведена оценка содержания газовой фазы кислорода после прохождения потока окислителя через систему подачи. На примере камеры с наружным диаметром 200 мм и сужением на выходе показано, что непрерывная спиновая детонация реализуется при содержании газовой фазы в потоке кислорода более 70 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Войцеховский Б. В.** Стационарная детонация // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 129, № 6. — С. 1254–1256.
2. **Быковский Ф. А., Васильев А. А., Ведерников Е. Ф., Митрофанов В. В.** Детонационное горение газовой смеси в радиальных кольцевых камерах // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 4. — С. 111–118.
3. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Самоподдерживающаяся пульсирующая детонация потока газовой смеси // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 4. — С. 99–106.
4. **Быковский Ф. А., Ждан С. А.** Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
5. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Самсонов А. Н., Мисовец О. В.** Непрерывная детонация водородокислородной смеси в плоскорадиальной камере с истечением к периферии // XXXI Сибирский теплофизический семинар, 17–19 ноября 2014, Новосибирск, Россия: сб. докл. всерос. конф. — С. 173–178.
6. **Higashi J., Ishiyama S., Nakagami S., et al.** Experimental study of disk-shaped rotating detonation turbine engine // Proc. 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. — 2017. — <https://doi.org/10.2514/6.2017-1286>.
7. **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.
8. **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 plane-radial combustor with exhaustion toward the periphery // Advances in Pulsed and Continuous Detonations / S. M. Frolov (Ed.). — Moscow: Torus press, 2019. — С. 309–324.
9. **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, iss. 3. — P. 235–243. — <https://doi.org/10.1007/s00193-019-00919x>.
10. **Физические величины: справочник** / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
11. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Коэффициенты расхода насадков и их комбинаций при прямом и обратном течении // ПМТФ. — 1996. — Т. 37, № 4. — С. 98–104.
12. **Варгафтик Н. В.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1977.

Поступила в редакцию 24.10.2019.

Принята к публикации 19.02.2020.