

## СРОЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 534.222.2,544.454.3

НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ СМЕСИ  
КЕРОСИН — ВОЗДУХ С ДОБАВКОЙ ВОДОРОДА

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

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

В проточной кольцевой цилиндрической камере диаметром 503 мм впервые реализованы режимы непрерывной спиновой детонации двухфазных смесей авиационный керосин — воздух с небольшими добавками водорода.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, керосин, воздух, водород, поперечные детонационные волны, кольцевая камера сгорания.

DOI 10.15372/FGV20160318

Результаты изучения непрерывной спиновой детонации (НСД) по схеме Б. В. Войцеховского [1], вызывающие в последнее время интерес во всем мире, обобщены в книге [2]. Особый научный интерес представляет реализация НСД гетерогенной смеси керосин — воздух. Детонационное сжигание указанной смеси в камере типа жидкостного ракетного двигателя плоскорадиальной геометрии диаметром  $d_{c1} = 204$  мм исследовано в [3]. В кольцевой цилиндрической проточной камере (вариант воздушно-реактивного двигателя) диаметром  $d_{c1} = 306$  мм реализовать НСД смеси с жидким керосином удалось лишь при обогащении воздуха кислородом в массовом соотношении  $[O_2] : [N_2] = 1 : 1$  [4]. Результаты по вращающейся детонации в кольцевой камере диаметром  $d_{c1} = 168$  мм для гетерогенной смеси, состоящей из керосина с 20%-й добавкой изопропилнитрата, газообразного водорода и воздуха, приведены в [5]. В данном сообщении представлены результаты экспериментов по реализации режима НСД двухфазной смеси барботирован-

ного водородом керосина и воздуха в кольцевой цилиндрической проточной камере диаметром 503 мм.

Детонационная камера ДК-500 представляет собой коаксиальный канал диаметром  $d_c = 503$  мм, длиной  $L_c = 490$  мм с зазором между стенками  $\Delta = 18$  мм (рис. 1). Площадь проходного сечения канала камеры  $S_\Delta = \pi(d_c - \Delta)\Delta = 274.1$  см<sup>2</sup>. Воздух поступал в камеру сгорания из двух ресиверов объемом  $V_{r,a} = 43.3$  и 41.6 л по кольцевому коллектору 2 через кольцевую щель 3 шириной  $\delta = 3.5$  мм (площадь проходного сечения щели  $S_\delta = \pi(d_c - \delta)\delta =$

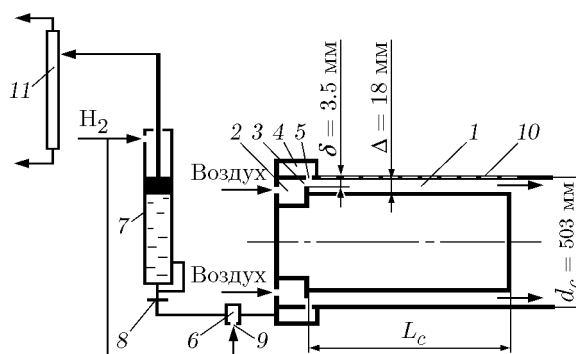


Рис. 1. Схема камеры сгорания ДК-500 для исследования НСД в гетерогенных смесях керосин — воздух с добавками водорода

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-01-00178а) и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-2695.2014.1).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., 2016.

Параметры НСД в ДК-500 ( $K_S = 5.0$ ) для гетерогенной смеси керосин/водород — воздух

№ опыта	$p_{m,a}/p_a$	$g_\Sigma$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	$\phi_f$	$\phi_H$	$m_H$ , %	$p_{c1}/p_a$	$p_{c30}/p_a$	$D$ , км/с	$n$	$f$ , кГц
1	13	527	0.32	0.51	42	5.52	5.75	1.48	5	4.86
2	12.6	559	0.34	0.51	40	5.8	6.2	1.45	4	3.81
3	12.8	557	0.68	0.41	21	5	5.7	1.49	3	2.93
4	10.3	513	1.18	0.25	8.7	3.4	4	1.49	2	1.96
5	6.9	362	1.29	0.27	8.4	2.5	3.2	1.56	1	1.02

54.9 см<sup>2</sup>). Степень расширения канала 1 камеры сгорания  $K_S = S_\Delta/S_\delta = 5.0$ . Жидкое горючее авиационный керосин (ТС-1) из расходомера 7 через диафрагму 8 вытеснялся в коллектор 4, а затем через форсунки 5 в камеру. Давление на поршень осуществлялось газообразным водородом, поступающим из ресивера объемом  $V_{r,f} = 13.8$  л (на рис. 1 не показан). Часть водорода через трубопровод и диафрагму 9 подавали в смеситель 6, осуществляя его барботирование в жидком керосине перед подачей в коллектор 4.

Начальные давления в ресиверах устанавливали постоянными: воздуха —  $p_{r,a1} = p_{r,a2} = 60 \cdot 10^5$  Па, водорода —  $p_{r,H} = 65 \cdot 10^5$  Па. В опытах, длительность которых лимитировалась временем истечения керосина ( $\approx 0.3$  с), расходы компонентов гетерогенной смеси, определяемые по методике [2], изменялись в диапазонах: воздуха —  $G_a = 7.0 \div 14.8$  кг/с, водорода —  $G_H = 0.06 \div 0.35$  кг/с, керосина  $G_f = 0.3 \div 1$  кг/с. При этом массовая доля водорода в двухфазном горючем  $m_H = G_H/(G_f + G_H)$  изменялась в пределах  $m_H = 8.4 \div 42$  %. Удельные расходы воздуха через щель  $g_\delta = G_a/S_\delta$  и топливоздушная смеси через проходное сечение канала камеры сгорания  $g_\Sigma = (G_a + G_f + G_H)/S_\Delta = g_\delta(1 + \phi_f/L_{f,st} + \phi_H/L_{H,st})/K_S$  варьировались в разных опытах в пределах  $g_\delta = 1110 \div 2690$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и  $g_\Sigma = 230 \div 565$  кг/(с·м<sup>2</sup>). Диапазоны коэффициентов избытка керосина и водорода составляли  $\phi_f = (G_f/G_a)L_{f,st} = 0.17 \div 1.3$  и  $\phi_H = (G_H/G_a)L_{H,st} = 0.23 \div 0.51$ . Здесь  $L_{f,st} = G_a/G_{f,st} = 15.24$ ,  $L_{H,st} = G_a/G_{H,st} = 34.63$  — стехиометрические коэффициенты керосина и водорода соответственно. Инициирование процесса проводилось так же, как в [6], а истечение продуктов детонации происходило в окружающую среду с давлением  $p_a = 10^5$  Па.

Процесс фотографировался высокоскоростной камерой Photron Fastcam SA1.1 675K-M3 в режиме съемки 400 000 кадр/с через продольные окна из оргстекла 10, расположенные друг за другом вдоль стенки камеры (см. рис. 1). Размеры каждого окна: ширина 20 мм, длина 93 мм, расстояние между окнами 24 мм, а от начала камеры до первого окна — 29 мм. Размеры окон использовались в качестве масштаба при анализе происходящих процессов. Обработка фотографий и получение фоторегистрограмм, по которым определяли частоту вращения волн  $f$  и скорость НСД  $D$  (относительно среднего диаметра кольцевого зазора камеры), аналогичны [6]. Давление водорода ( $p_{r,H}$ ) и воздуха ( $p_{r,a1}$ ,  $p_{r,a2}$ ) в ресиверах и соответствующих коллекторах ( $p_{m,f}$  и  $p_{m,a}$ ), а также статическое ( $p_{c1}$ ,  $p_{c2}$ ,  $p_{c3}$ ) и полное ( $p_{c30}$ ) давление регистрировались на расстоянии 15, 100 мм от переднего торца камеры ( $p_{c1}$ ,  $p_{c2}$ ) и вблизи ее выхода ( $p_{c3}$  и  $p_{c30}$ ) датчиками давления S-10 фирмы ВИКА. Ход поршня  $L_p$  расходомера 7 регистрировался реостатным датчиком 11. Регистрация измеряемых параметров и обработка результатов проводились с помощью компьютера.

В камере ДК-500 для смеси двухфазного горючего авиационный керосин — водород с воздухом впервые реализованы режимы НСД с числом поперечных детонационных волн (ПДВ) от пяти до одной. На рис. 2 представлены типичные фрагменты фоторегистрограмм ПДВ пятиволнового ( $a$ ) и одноволнового ( $b$ ) режимов НСД, а их параметры — в таблице (опыты 1 и 5 соответственно). ПДВ движутся слева направо и достаточно стабильны на данном отрезке времени. Шлейф отклонен назад, что указывает на интенсивную детонационную волну.

При  $g_\Sigma = 527$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi_f = 0.32$ ,  $\phi_H = 0.51$  был реализован (см. рис. 2,  $a$ ) пятиволновый режим НСД с частотой ПДВ  $f = 4.86$  кГц

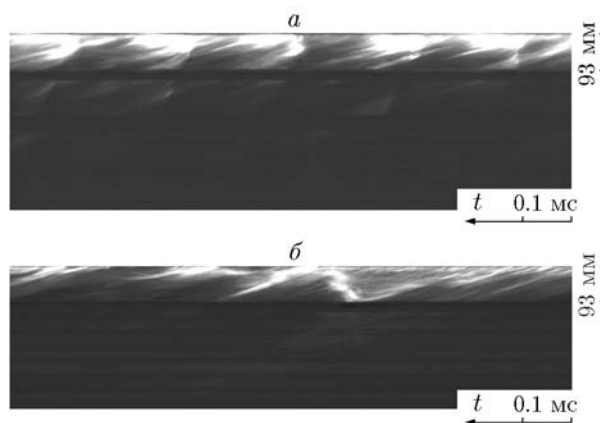


Рис. 2. Фрагменты фоторегистрограмм ПДВ в двухфазной смеси керосин/водород — воздух:

$a - n = 5$ ,  $b - n = 1$

и скоростью детонации  $D = 1.48$  км/с при  $m_H = 42$  %. Высота фронта ПДВ составляла  $h \approx 60 \div 70$  мм.

При  $g_{\Sigma} = 362$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\phi_f = 1.29$ ,  $\phi_H = 0.27$  наблюдали (см. рис. 2, б) одноволновый режим НСД с  $f = 1.02$  кГц и  $D = 1.56$  км/с при минимальном значении  $m_H = 8.4$  %. Яркосветящаяся часть фронта ПДВ примерно вдвое больше, чем на рис. 2, а. Линии тока натекающей смеси видны и в верхней части второго окна, но из-за слабого свечения волны затруднительно утверждать, что в этой части фронта идет интенсивное энерговыделение.

Из таблицы следует, что в гетерогенной смеси керосин/водород — воздух при уменьшении массовой доли водорода в двухфазном горючем и удельного расхода воздуха уменьшаются количество ПДВ и частота их вращения. Отметим также, что реализовать в камере ДК-500 непрерывную детонацию смеси керосин — воздух без добавки водорода не удалось, наблюдался только режим турбулентного горения. Согласно экспериментальным данным [7] нижний предел классической газовой детонации водородовоздушной смеси по доле водорода в ней равен  $\phi_H \approx 0.5$ . Последнее означает, что режимы НСД гетерогенной смеси керосин/водород — воздух с параметрами, приведенными в таблице, реализуются при сжигании значительной части жидкого керосина во фронте ПДВ.

Таким образом, в камере ДК-500 впервые реализован режим НСД гетерогенной смеси жидкого керосина и воздуха с добавкой газообразного водорода. Без добавки водорода режим НСД не был получен. Применение барботирования жидкого керосина газообразным водородом позволило уменьшить массовую долю водорода в двухфазном горючем до 8.4 %, т. е. более чем в три раза по сравнению с [5]. Структура ПДВ в исследованной гетерогенной топливовоздушной смеси подобна наблюдавшимся в смеси синтез-газ — воздух [6]. Установлено, что при  $\phi_f \approx 1$ ,  $m_H \approx 10$  % и  $g_{\Sigma} > 500$  кг/(с·м<sup>2</sup>) критический диаметр НСД гетерогенной топливовоздушной смеси керосин/водород — воздух можно уменьшить до  $d_{cr} = 250$  мм, а при  $\phi_f \approx 1$ ,  $m_H \approx 20$  % и  $g_{\Sigma} > 550$  кг/(с·м<sup>2</sup>) — до  $d_{cr} = 168$  мм. Заметим, что удельные расходы смеси, при которых получены режимы НСД в смеси керосин/водород — воздух, на порядок больше, чем в работе [5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Войцеховский Б. В.** Стационарная детонация // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 129, № 6. — С. 1254–1256.
2. **Быковский Ф. А., Ждан С. А.** Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
3. **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.
4. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 107–115.
5. **Kindracki J.** Experimental research on rotating detonation in liquid fuel-gaseous air mixtures // Aerospace Sci. Technol. — 2015. — V. 43. — P. 445–453.
6. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Самсонов А. Н.** Влияние геометрии камеры на реализацию непрерывной спиновой детонации смесей синтез-газ — воздух // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 6. — С. 72–84.
7. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1968.

Поступила в редакцию 29/XII 2015 г.