

УДК 534.222,544.454.3

# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕПРЕРЫВНОЙ ДЕТОНАЦИИ ТОПЛИВОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ (ОБЗОР)

Ф. А. Быковский, С. А. Ждан

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

Представлено современное состояние экспериментальных исследований непрерывной детонации топливовоздушных смесей в проточных кольцевых камерах сгорания. Подробно проанализированы, систематизированы и обобщены экспериментальные данные для смесей  $C_2H_2$  — воздух,  $H_2$  — воздух,  $CO/H_2$  — воздух. Описаны основные особенности непрерывной спиновой детонации и влияние на нее геометрических параметров проточных камер сгорания. Проанализировано влияние физических и химических параметров на область реализации непрерывной детонации. Сформулирован вывод о том, что полученные к настоящему времени фундаментальные научные знания о непрерывных детонационных процессах в водородных и углеводородных горючих позволяют говорить о возможности их применения в воздушно-реактивных детонационных двигателях.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, воздушно-реактивный двигатель, камера сгорания, топливовоздушные смеси.

## ВВЕДЕНИЕ

Для современной реактивной техники представляет интерес применение термодинамического детонационного цикла в воздушно-реактивных двигателях (ВРД). Известно два способа реализации такого цикла: пульсирующий детонационный процесс, на основе которого функционирует пульсирующий детонационный двигатель [1]; непрерывный детонационный процесс, лежащий в основе непрерывного детонационного двигателя [2]. Обзор современного состояния фундаментальных и прикладных исследований пульсирующего детонационного двигателя представлен в [3], а фундаментальные основы непрерывной спиновой детонации (НСД) ряда топлив в кольцевых камерах сгорания подробно описаны в [4, 5].

За последнее десятилетие, судя по публикациям, стали интенсивно исследоваться режимы НСД топливовоздушных смесей (ТВС) для реализации непрерывного детонационного цикла в ВРД. Цель данного обзора — анализ современного состояния исследований по непре-

рывной детонации ТВС. Предпринята также попытка систематизировать и обобщить опубликованные в разрозненных статьях фундаментальные научные знания по реализации НСД в различных ТВС применительно к ВРД.

## 1. РЕАЛИЗАЦИЯ НСД В ТВС

Впервые непрерывные спиновые детонационные режимы сжигания ТВС с использованием как газообразных (метан, водород), так и жидких (керосин, дизельное топливо) горючих были осуществлены в камере плоскорадиальной геометрии с внешним диаметром  $d_c = 200$  мм и истечением продуктов детонации к центру [6]. Подача воздуха в камеру сгорания проводилась через отверстия форсунок малого сечения с достаточно высоким гидравлическим сопротивлением. Однако с практической точки зрения интересен вариант ВРД, когда воздух подается в камеру сгорания сплошным потоком, т. е. реализуется проточный вариант камеры сгорания. Для двигателя типа ВРД, работающего по принципу НСД, наиболее подходят камеры кольцевой цилиндрической геометрии.

В цилиндрических камерах этого типа диаметром 40 и 100 мм сначала была успешно реализована НСД химически активных смесей ацетилен — кислород и водород — кислород [7, 8]. При использовании же воздуха в качестве окислителя размеры указанных камер ока-

Работа выполнена по программе фундаментальных научных исследований III.22.2.1 (§ 2), а также при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-01-00178а) (§ 1) и гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-2695.2014.1).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., 2015.

записи недостаточными для реализации НСД в ТВС, поэтому дальнейшие эксперименты проводились в кольцевой цилиндрической камере внешнего диаметра  $d_c = 306$  мм. В ней впервые удалось осуществить НСД смесей ацетилен — воздух [9], водород — воздух [10], синтез-газ — воздух [11]. Рассмотрены структуры поперечных детонационных волн (ПДВ) и течения в их окрестности, а также условия, свойства и области существования НСД указанных ТВС. В работах [12, 13] проведена независимая экспериментальная проверка реализации НСД в смеси водород — воздух, подтвердившая ее существование.

### 1.1. Экспериментальная детонационная камера

Камера сгорания 1 (рис. 1) представляла собой осесимметричный кольцевой канал длиной  $L_c = 150 \div 780$  мм, образованный наружной стенкой 2 диаметром  $d_c = 306$  мм (ДК 300) и внутренней стенкой 3 (цилиндрической или конической). Расстояние между стенками (ширина кольцевого канала) варьировалось в диапазоне  $\Delta = 7 \div 38$  мм. Также варьировалась ширина кольцевой щели подачи воздуха 4 в пределах  $\delta = 1 \div 23$  мм. Площадь сечения камеры определялась по формуле  $S_c = \pi(d_c - \Delta)\Delta$ , щели подачи воздуха — по формуле  $S_\delta = \pi(d_c - \delta)\delta$ .

Часть опытов проведена в расширяющемся от  $\Delta = 23$  мм канале с углом  $15^\circ$  (штриховой контур) и длиной цилиндрического участка  $L_z = 35 \div 300$  мм. Воздух поступал в ДК 300 из кольцевого коллектора 5 с площадью осевого сечения  $29.6 \text{ см}^2$  через кольцевую щель 4. Горючее подавалось из коллектора 6 через форсунки 7 с равномерно расположенными по окружности наружной стенки камеры попарно встречными (под углом  $90^\circ$ ) каналами. В форсунке F1 использовалось 200 каналов сече-

нием  $1 \times 1$  мм, в F2 — 200 каналов сечением  $0.4 \times 0.5$  мм, в F3 — 400 каналов сечением  $0.3 \times 1.65$  мм. В камере ДК 300 выходы отверстий форсунок располагались на расстоянии  $L_f = 1$  мм вниз по потоку от щели подачи воздуха. Газы подавали из ресивера воздуха объемом  $V_{r,a} = 79.8$  л и ресивера горючего объемом  $V_{r,f} = 13.3$  или 3.3 л через быстродействующие клапаны с электрическим управлением. Продукты детонации вытекали в атмосферу. Длительность процесса задавали системой управления в диапазоне  $t_d = 0.3 \div 0.8$  с. Детонация инициировали на расстоянии 150 мм от форсунки горючего электродетонатором с массой ВВ около 0.2 г или пережиганием электротокотом полосы алюминиевой фольги с выделением энергии  $\approx 5$  Дж. Весь процесс фотографировали через продольные окна в наружной стенке камеры на пленку фоторегистратора с падающим барабаном, а расход компонентов смеси в течение эксперимента определяли по методике [5]. При реализации НСД по фоторегистрограммам определяли время появления ПДВ против окна  $\Delta t$ , которое позволяло однозначно находить частоту их вращения  $f$  и скорость НСД  $D$  относительно среднего диаметра по формулам

$$f = \frac{1}{\Delta t}, \quad D = \frac{\pi \langle d_c \rangle}{n \Delta t}. \quad (1)$$

Здесь  $\langle d_c \rangle = d_c - \Delta$  — средний диаметр кольцевого канала камеры,  $n$  — число ПДВ вдоль окружности камеры.

Компьютерная система регистрировала сигналы с датчиков давления газов: в ресиверах ( $p_{r,a}$ ,  $p_{r,f}$ ), коллекторах ( $p_{m,a}$ ,  $p_{m,f}$ ), в начале камеры на расстоянии 15 мм ( $p_c$ ), а также вблизи выхода из камеры (статическое  $p_{ex}$  и полное  $p_{ex0}$  давление).

### 1.2. Результаты экспериментов

К настоящему времени в проточных кольцевых цилиндрических камерах сгорания успешно реализованы режимы НСД в смесях ацетилен — воздух, водород — воздух и синтез-газ — воздух (табл. 1).

**$C_2H_2$  — воздух.** В экспериментах с описанной выше геометрией камеры сгорания и системой подачи компонентов смеси, включающей форсунку F1 и щель подачи воздуха шириной  $\delta = 1 \div 10$  мм, варьировали следующие параметры: расход воздуха  $G_{a0} = 2.12 \div 5.3$  кг/с,

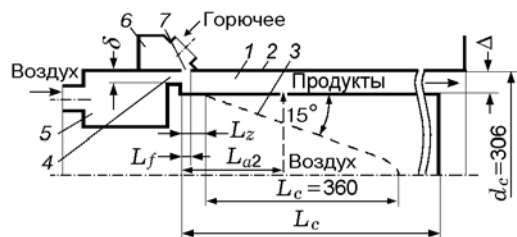


Рис. 1. Схема кольцевой детонационной камеры

Таблица 1

Топливоздушные смеси, в которых была осуществлена НСД  
в проточных кольцевых цилиндрических камерах сгорания различного диаметра

№ п/п	Смесь	Год	$d_c$ , мм	$\delta$ , мм	$\Delta$ , мм	$L_c$ , мм	$f$ , кГц	$n$	Источник
1	$C_2H_2 + \text{воздух}$	2005	306	$1 \div 10$	23	665	$0.9 \div 1.7$	1	[9]
2	$H_2 + \text{воздух}$	2006	306	$1 \div 10$	$16.5 \div 38$	$310 \div 665$	$1.15 \div 4.76$	$1 \div 3$	[10]
3	$H_2 + \text{воздух}$	2011	95; 150	$0.5 \div 2$	$5 \div 10$	$\approx 200$	$2.76 \div 5$	1	[12]
4	$CO/H_2 + \text{воздух}$	2012	306	3	16.5	570	$1.41 \div 3.0$	$1 \div 2$	[11, 14]

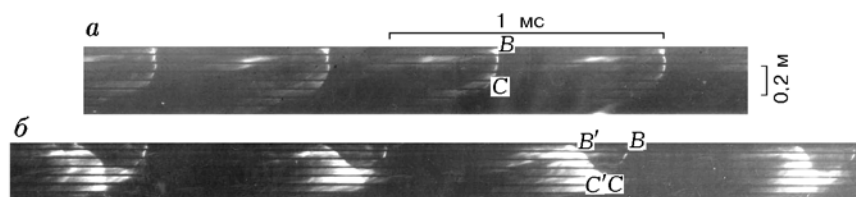


Рис. 2. Фоторегистрограмма ПДВ в камере ДК 300 в смеси  $C_2H_2 - \text{воздух}$  ( $\delta = 1$  мм,  $\Delta = 23$  мм,  $L_c = 665$  мм):

$a - g_\Sigma = 146$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $p_c = 2.2 \cdot 10^5$  Па,  $\phi = 1.35$ ,  $D = 1.5$  км/с,  $f = 1.69$  кГц;  $b - g_\Sigma = 114$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $p_c = 1.2 \cdot 10^5$  Па,  $\phi = 1.3$ ,  $D = 1.1$  км/с,  $f = 1.24$  кГц

расход горючего  $G_{f0} = 0.21 \div 0.3$  кг/с, коэффициент избытка горючего  $\phi = 0.46 \div 1.37$ . При этом удельный расход ТВС в камере  $g_\Sigma = (G_a + G_f)/S_c$  изменялся в диапазонах  $g_\Sigma = 42 \div 111$ ,  $67 \div 160$  и  $127 \div 209$  кг/(с·м<sup>2</sup>) при  $\Delta = 38$ , 23 и 16.5 мм соответственно.

Во всех случаях была реализована НСД с одной детонационной волной ( $n = 1$ ), вращающейся в одном направлении. На рис. 2 представлены фрагменты процесса с ПДВ, движущейся слева направо. Течение в ее окрестности соответствует течению в системе волны. Через каждый оборот по окружности камеры ПДВ проходит мимо продольных окон камеры. Встречных ПДВ не обнаружено. Достаточно хорошо высвечивается детонационный фронт  $BC$  вследствие попадания в него специально вдуваемой струйки ацетилена.

Наблюдаются два характерных типа ПДВ: с фронтом химической реакции (горения), примыкающим к лидирующему ударному фронту  $BC$  (тип I, рис. 2,  $a$ ), и с отстающим от него пульсирующим фронтом горения  $B'C'$  (тип II, рис. 2,  $b$ ). Последняя структура, как правило, наблюдается при пониженном давлении в камере, соотношении компонентов, близком к пределу ( $\phi = 0.7$ ), недостаточном качестве смешения и сильном влиянии ПДВ на состояние воздуха в коллекторе при дозвуковом истечении воздуха

из щели ( $\delta = 10$  мм,  $\delta/\Delta = 0.435$ ). Средняя скорость волн типа II, несмотря на нестационарность потока за лидирующим ударным фронтом, стабильна и имеет отклонения не более  $\pm 1\%$  на смежных оборотах.

При среднем статическом давлении в камере на расстоянии 15 мм от торца  $p_c = (1 \div 2.5) \cdot 10^5$  Па размер ПДВ типа I составляет  $h \approx 23$  см  $\approx (25 \div 60)a$ , где  $a$  — характерный размер при многофронтной детонации («размер ячейки») [15]. Постоянство величины  $h$  обусловлено, по-видимому, готовностью смеси к детонации, т. е. процессами перемешивания компонентов, слабо зависящими от значения  $p_c$ . Зона свечения за фронтом  $BC$  волны типа I около 1 см, т. е. около  $2a$  при  $p_c = 2.2 \cdot 10^5$  Па. Размер ПДВ типа II больше:  $h \approx 35$  см  $\approx (35 \div 45)a$  — и изменялся незначительно в интервале давления  $p_c = (1 \div 1.3) \cdot 10^5$  Па. Отношение  $h/a$  для ТВС в  $3 \div 5$  раз больше, чем для газовых топливокислородных смесей (ТКС) при хорошем смешении. Отношение размера ПДВ к расстоянию между волнами находится в диапазоне  $h/l = 1/4 \div 1/3$  ( $l = \pi d_c$  при  $n = 1$ ). Для ТКС  $h/l = 1/10 \div 1/5$  [5]. Отличие относительного размера детонационного фронта для ТВС вызвано отсутствием (или неразвитостью) фронта горения со стороны продуктов, а также сверхзвуковой скоростью смеси в лабораторной системе

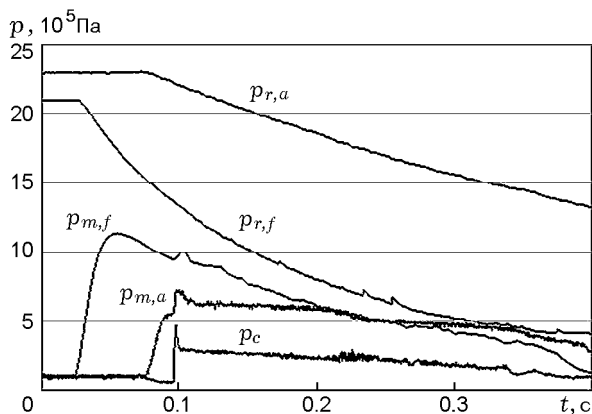


Рис. 3. Осциллограммы изменения давления при НСД смеси  $C_2H_2$  — воздух:

$\delta = 2$  мм,  $\Delta = 16.5$  мм,  $L_c = 500$  мм,  $D = 1.51 \rightarrow 0.99$  км/с,  $f = 1.7 \rightarrow 1.11$  кГц,  $n = 1$

ме координат перед фронтом ПДВ. Измеренная осевая скорость смеси, проходящей через нижнюю часть фронта, составляет  $\approx 600$  м/с и приближается к максимально возможной для стационарного течения —  $v_{\max} = [2/(\gamma - 1)]^{0.5} c_0$ , где  $\gamma$  и  $c_0$  — показатель изоэнтропы и скорость звука воздуха в ресивере. Этой скорости соответствует число Маха  $M = 2.8$ .

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы изменения во времени давления в ресиверах воздуха  $p_{r,a}$  и ацетилена  $p_{r,f}$ , коллекторах воздуха  $p_{m,a}$  и ацетилена  $p_{m,f}$ , а также в камере сгорания  $p_c$  на расстоянии 15 мм от закрытого торца для НСД смеси  $C_2H_2$  — воздух. Видно, что ацетилен поступал в камеру раньше, чем воздух. Поэтому инициирование детонации ( $t \approx 0.1$  с) синхронизировалось с повышением давления в коллекторе воздуха. Избыточное содержание ацетилена в камере на момент инициирования способствовало реализации непрерывного детонационного режима. Со-

гласно фоторегистрограмме процесса, от момента инициирования ( $t \approx 0.1$  с) до закрытия клапанов ( $t \approx 0.4$  с) реализовывалась одноволновая НСД. Основные параметры детонационных режимов ТВС ацетилен — воздух приведены в табл. 2.

**$H_2$  — воздух.** Варьируемые параметры подачи: начальный расход воздуха —  $G_{a0} = 1.6 \div 9$  кг/с, водорода —  $G_{f0} = 0.07 \div 0.39$  кг/с,  $\phi = 0.4 \div 3.34$ . В течение эксперимента расходы компонентов уменьшались, но расход водорода изменялся быстрее, чем воздуха. В результате происходило постепенное обеднение смеси горючим.

Типичный фрагмент фоторегистрограммы (примерно 1/8 ее часть) НСД в камере ДК 300 представлен на рис. 4. Отметим исключительную стабильность скорости ПДВ и устойчивость их структуры в диапазоне давления  $p_c = (1.8 \rightarrow 1.2) \cdot 10^5$  Па. Заметим, что время переходного процесса от момента инициирования до появления трех устойчивых ПДВ ( $n = 3$ ) достаточно короткое —  $3 \div 4$  мс, что составляет  $3 \div 4$  оборота волны вокруг кольцевого канала.

Также хорошо виден переход (см. дорожки 6, 7) от трех ПДВ к двум. Высота фронта ПДВ составляет  $h \approx 8$  см при  $n = 3$  и  $h \approx 12$  см при  $n = 2$ . Сопоставление структур фронта НСД исследованных ТВС показало, что при  $\delta = 2$  мм ( $\delta/\Delta = 0.087$ ) и максимальных удельных расходах число волн в смеси  $H_2$  — воздух (см. рис. 4) втрое больше, чем в смеси  $C_2H_2$  — воздух (см. рис. 2, а). Известно, что в заранее приготовленных стехиометрических смесях размер ячейки  $a$  для смеси  $C_2H_2$  — воздух примерно в 1.5 раза меньше, чем для смеси  $H_2$  — воздух [16]. Этот неожиданный результат связан, по-нашему мнению, с преобладающим влиянием процесса смещения компонентов над хи-

Таблица 2

Параметры НСД смеси  $C_2H_2$  — воздух при различных размерах кольцевой щели (форсунка F1)

$\delta$ , мм ( $\delta/\Delta$ )	$g_{\Sigma}$ , кг/(с · м <sup>2</sup> )	$\phi$	$p_{m,a}$ , $10^5$ Па	$D$ , км/с	$p_c$ , $10^5$ Па	$p_{m,a}/p_c$
1 (0.043)	111 $\div$ 56	1.22 $\div$ 1.28	6.67 $\div$ 3.4	1.1 $\div$ 1.27 $\div$ 1.23	1.2 $\div$ 1.0	5.66 $\div$ 3.4
2 (0.087)	—//—	—//—	3.6 $\div$ 1.82	1.48 $\div$ 1.43	1.27 $\div$ 1.0	2.83 $\div$ 1.82
3 (0.13)	—//—	—//—	2.7 $\div$ 1.34	1.35 $\div$ 1.27	1.3 $\div$ 1.0	2.03 $\div$ 1.34
10 (0.435)	—//—	—//—	1.53 $\div$ 1.12	0.89 $\div$ 0.7 неустойчивая	1.22 $\div$ 1.06	1.25 $\div$ 1.06

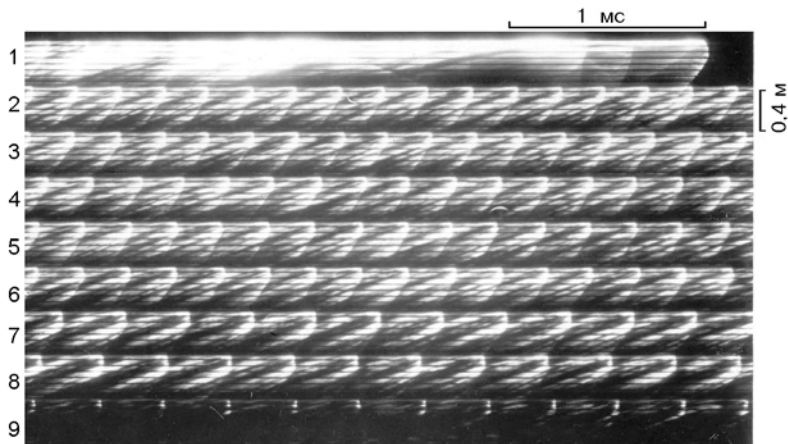


Рис. 4. Фоторегистрограмма ПДВ в смеси  $H_2$  — воздух:

$\delta = 2$  мм, форсунка F2,  $\delta/\Delta = 0.087$ ;  
 $D = 1.35$  км/с ( $n = 3$ )  $\rightarrow D = 1.43$  км/с  
 ( $n = 2$ ) ( $f = 4.55 \rightarrow 3.22$  кГц),  $p_c =$   
 $(1.8 \rightarrow 1.2) \cdot 10^5$  Па

Таблица 3

Параметры НСД смеси  $H_2$  — воздух при различных размерах кольцевой щели (форсунка F1)

$\delta$ , мм ( $\delta/\Delta$ )	$g_{\Sigma}$ , кг/(с · м <sup>2</sup> )	$\phi$	$p_c$ , 10 <sup>5</sup> Па	$p_{m,a}/p_c$	$n$	$D$ , км/с
1 (0.043)	139 $\rightarrow$ 116	1.83 $\rightarrow$ 1.2	1.98 $\rightarrow$ 1.8	5.7	2 $\rightarrow$ 1	1.36 $\rightarrow$ 1.21
	116 $\rightarrow$ 98	1.2 $\rightarrow$ 0.77	1.8 $\rightarrow$ 1.55	5.7 $\rightarrow$ 5.5	1	1.35 $\rightarrow$ 0.98
2 (0.087)	139 $\rightarrow$ 116	1.83 $\rightarrow$ 1.2	1.85 $\rightarrow$ 1.77	3.24 $\rightarrow$ 3.47	3 $\rightarrow$ 2	1.41 $\rightarrow$ 1.35
	116 $\rightarrow$ 104	1.2 $\rightarrow$ 0.9	1.77 $\rightarrow$ 1.5	3.47 $\rightarrow$ 3.01	2 $\rightarrow$ 1	1.39 $\rightarrow$ 1.11
	104 $\rightarrow$ 85	0.9 $\rightarrow$ 0.6	1.55 $\rightarrow$ 1.4	3.01 $\rightarrow$ 2.5	1	1.27 $\rightarrow$ 1.11
3 (0.13)	139 $\rightarrow$ 108	1.83 $\rightarrow$ 1	1.8 $\rightarrow$ 1.4	2.28 $\rightarrow$ 2.14	2 $\rightarrow$ 1	1.53 $\rightarrow$ 1.31
	108 $\rightarrow$ 90	1 $\rightarrow$ 0.62	1.6 $\rightarrow$ 1.2	1.88 $\rightarrow$ 2	1	1.48 $\rightarrow$ 0.98
6 (0.26)	139 $\rightarrow$ 90	1.83 $\rightarrow$ 0.62	1.8 $\rightarrow$ 1.2	1.39 $\rightarrow$ 1.5	1	1.45 $\rightarrow$ 0.97
10 (0.435)	139 $\rightarrow$ 116	1.83 $\rightarrow$ 1.2	1.8 $\rightarrow$ 1.6	1.17 $\rightarrow$ 1.56	1	1.39 $\rightarrow$ 0.93

мическими свойствами смесей, в частности, с более интенсивным перемешиванием компонентов водород — воздух вследствие большей разности скоростей струй на контактных границах, определяющих интенсивность и масштаб турбулентности. Основные параметры детонационных режимов ТВС водород — воздух представлены в табл. 3.

В работе [12] проведена независимая экспериментальная проверка реализации НСД в смеси водород — воздух. Рассмотрены две кольцевые цилиндрические камеры сгорания внешнего диаметра  $d_c = 95$  и  $150$  мм с кольцевой щелью шириной  $\delta = 0.5 \div 2$  мм и шириной канала  $\Delta = 10 \div 20$  мм. В результате измерения высокочастотными датчиками профилей давления (рис. 5) при непрерывной детонации в камере авторами установлено, что при давлении подачи воздуха  $p_{m,a} = 6 \rightarrow 4$  атм и  $\phi \approx 0.5$  реализу-

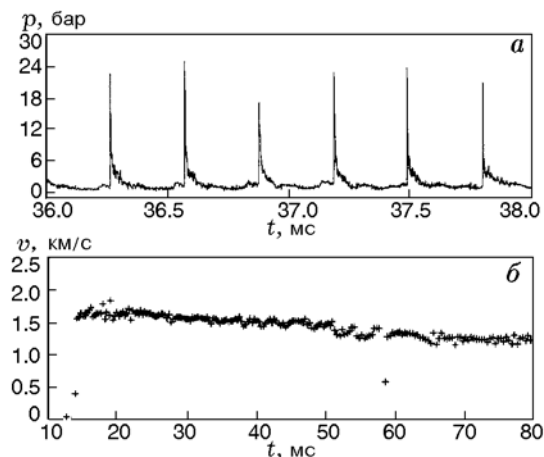


Рис. 5. Профили давления (а) и скорость (б) НСД смеси водород — воздух [12]

ется одноволновый режим НСД с параметрами: а)  $D = 1.5 \rightarrow 1.3$  км/с,  $f = 5.03 \rightarrow 4.35$  кГц при  $d_c = 95$  мм; б)  $D = 1.5 \rightarrow 1.3$  км/с,  $f = 3.18 \rightarrow 2.76$  кГц при  $d_c = 150$  мм.

Детальное исследование режимов НСД в смеси водород — воздух выполнено в [13] в кольцевой цилиндрической камере внешнего диаметра  $d_c = 152$  мм, длиной  $L_c = 133$  мм с кольцевой щелью шириной  $\delta = 3.17$  мм и шириной канала  $\Delta = 7.62$  мм. Установлено, что в диапазоне удельных расходов смеси  $g_\Sigma = 350 \div 481$  кг/(с·м<sup>2</sup>) при  $\phi = 1.0 \pm 0.1$  формируется одноволновый режим НСД с параметрами  $D = 1.41 \div 1.56$  км/с,  $f = 2.95 \div 3.27$  кГц. При этом с ростом удельного расхода ТВС монотонно растет скорость НСД. Корреляция экспериментальных результатов обсуждается ниже.

**Синтез-газ — воздух.** Перспективным топливом может оказаться синтез-газ, состоящий из смеси водорода (H<sub>2</sub>) и монооксида углерода (CO). В камере ДК 300 длиной  $L_c = 570$  мм, включающей в себя форсунку F3, щель подачи воздуха шириной  $\delta = 3$  мм и зазор  $\Delta = 16.5$  мм, были исследованы [11, 14] смеси оксида углерода и водорода трех составов: CO + H<sub>2</sub>; CO + 2H<sub>2</sub>; CO + 3H<sub>2</sub>. Варьируемые параметры: начальный расход воздуха  $G_{a0} = 1.38 \div 3.73$  кг/с, синтез-газа —  $G_{f0} = 0.15 \div 0.51$  кг/с,  $\phi = 0.5 \div 1.9$ . Удельный расход смеси синтез-газ — воздух в разных опытах изменялся в пределах  $g_\Sigma = 34 \div 260$  кг/(с·м<sup>2</sup>).

На рис. 6 приведен фрагмент типичной фоторегистрограммы непрерывного детонационного сгорания смеси CO + 2H<sub>2</sub> — воздух от начала инициирования (яркая вспышка на 1-й дорожке) до окончания фиксирования его на пленку (последняя, 14-я дорожка, дорожки 5–12 не показаны). Длительность этого фрагмента вдоль дорожки составляет 1.63 мс, между дорожками — 33.3 мс.

ПДВ движутся слева направо: сначала две волны по окружности камеры, затем в промежутке времени между 6-й и 7-й дорожками происходит смена режима на одноволновый. За время регистрации уменьшились удельный расход ТВС  $g_\Sigma = 218 \rightarrow 74$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и давление в камере  $p_c = 2.5 \rightarrow 1.3 \cdot 10^5$  Па, а коэффициент избытка горючего увеличился —  $\phi = 0.89 \rightarrow 1.36$ . При этом скорость ПДВ падает ( $n = 2$ ,  $D = 1.37 \rightarrow 1.27$  км/с), а с переходом на одноволновый режим резко возрастает и затем монотонно уменьшается к концу процесса ( $D = 1.52 \rightarrow 1.28$  км/с). В камере реализуются

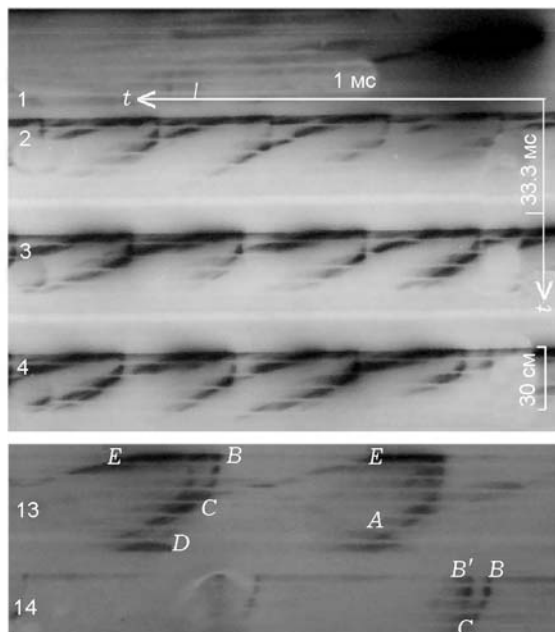


Рис. 6. Фрагмент фоторегистрограммы НСД смеси CO + 2H<sub>2</sub> — воздух:

$n = 2$  — дорожки 2–4,  $n = 1$  — дорожки 13, 14;  $\delta = 3$  мм, форсунка F3,  $\delta/\Delta = 0.182$ ,  $L_c = 570$  мм

в основном ПДВ типа I [9], когда фронт горения сливается с ведущим ударным фронтом с образованием детонационного фронта BC (см. рис. 6, 13-я дорожка). Здесь CD — ударная волна в продуктах (шлейф), примыкающая к детонационному фронту, EC — контактный разрыв (фронт горения) между свежей смесью и продуктами. В конце процесса статическое давление в камере мало отличается от атмосферного ( $p_c \approx 1.3 \cdot 10^5$  Па), поэтому просматривается и ударная волна AB, заходящая в камеру и тормозящая сверхзвуковой поток продуктов. Поскольку она заходит в область смесеобразования, это влияет на начальные условия перед ПДВ (в данном опыте снижает скорость непрерывной детонации). В условиях предела существования НСД появляются также волны типа II [9], когда фронт горения B'C отстает от ударного BC (см. рис. 6, 14-я дорожка). Размер фронта BC (размер ПДВ) составляет  $h \approx 13$  см при  $n = 2$  и  $h \approx 21$  см при  $n = 1$ , а отношение размера ПДВ к расстоянию между волнами —  $h/l = 1/5 \div 1/4$ . Основные параметры НСД исследованных смесей синтез-газа с воздухом вблизи стехиометрии представлены в табл. 4.

Проведенный анализ параметров НСД рас-

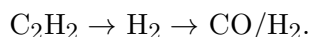
Таблица 4

Параметры НСД смеси  $\text{CO}/\text{H}_2$  — воздух для трех составов синтез-газа  
( $\delta = 3$  мм,  $\Delta = 16.5$  мм,  $L_c = 570$  мм)

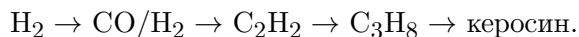
Горючее	$p_{m,a}, 10^5$ Па	$g_{\Sigma}, \text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$\phi$	$D, \text{км}/\text{с}$	$n$	$p_c, 10^5$ Па
$\text{CO} + \text{H}_2$	5.5 → 3.65	295 → 184	0.96 → 0.85	1.51 → 1.1	2	3.5 → 2.3
	3.65 → 3.5	184 → 166	0.85	неустойчивая	2 ↔ 1	2.3 → 2.15
	3.5 → 1.4	166 → 48	0.85 → 0.93	1.36 → 0.92	1	2.15 → 1.02
$\text{CO} + 2\text{H}_2$	4.8 → 3.2	218 → 144	0.89 → 1.05	1.37 → 1.27	2	2.5 → 1.83
	3.2 → 1.87	144 → 74	1.05 → 1.36	1.52 → 1.28	1	1.83 → 1.3
$\text{CO} + 3\text{H}_2$	5.1 → 2.5	240 → 115	0.9 → 1.15	1.37 → 1.22	2	2.7 → 1.64
	2.5 → 1.8	115 → 75	1.15 → 1.32	1.57 → 1.32	1	1.64 → 1.35

смотренных ТВС позволяет утверждать, что реализовать НСД в смесях синтез-газ — воздух труднее, чем в более химически активной смеси  $\text{H}_2$  — воздух. Также однозначно установлено, что при одинаковых удельных расходах смеси синтез-газ — воздух уменьшение доли водорода в составе синтез-газа приводит к уменьшению скорости ПДВ и их числа.

Ширина фронта ПДВ в смеси  $\text{H}_2$  — воздух составляет  $h \approx 24/n$  см при  $n = 1 \div 3$  [10]. Известно, что размеры детонационных ячеек и связанные с ними размеры ударно-детонационных скачков классической газовой детонации в заранее приготовленных ТВС коррелируют с химической активностью смесей [17] и увеличиваются в последовательности



Однако в режимах НСД в проточных кольцевых камерах сгорания укрупнение структуры ПДВ в этих же ТВС выстраивается по-другому:



При удельном расходе  $g_{\Sigma} = 100 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  число волн в смеси  $\text{H}_2$  — воздух втрое больше (в три раза меньше размер ПДВ), чем в смеси  $\text{C}_2\text{H}_2$  — воздух [10].

## 2. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НСД

Основные особенности, отличающие непрерывную спиновую детонацию в камерах от обычной спиновой и многофронтной детонации в трубах [15], следующие:

1) смесь перед ПДВ не подвергается предварительному сжатию в ударном скачке и является холодной, однако ее температура может

быть повышена за счет добавления части продуктов сгорания, оставшихся от предыдущей волны или образовавшихся в результате горения новой смеси в зонах контакта со старыми продуктами и с нагретыми стенками; возможны поджатие и нагрев исходной смеси продольными, идущими вверх по потоку волнами, обусловленными влиянием внешней среды или препятствиями (например, сужением кольцевого канала);

2) смесь перед ПДВ неидеально перемешана, поскольку она образуется в самой камере за относительно короткое время между последовательными проходами ПДВ;

3) ПДВ оказывает влияние на состояние смеси впереди себя, так как это состояние формируется при взаимодействии новой входящей в камеру смеси с продуктами детонации предшествующего цикла той же ПДВ либо другой такой же ПДВ, движущейся впереди любой рассматриваемой волны;

4) вследствие высоких, хотя и кратковременных пиков давления в ПДВ часто наблюдается обратное воздействие ПДВ на систему подачи горючего и окислителя, в частности может происходить заброс продуктов в коллекторы через кольцевую щель на входе в камеру и через отверстия форсунок;

5) стационарные ПДВ распространяются лишь в замкнутом кольцевом канале при одинаковом направлении вращения всех ПДВ;

6) размер слоя ТВС  $h$ , по которому распространяется фронт ПДВ, близок к критическому  $h^*$  для заданных компонентов ТВС и степени их перемешивания.

Несмотря на неоднородность смеси перед фронтом ПДВ, скорость волны  $D$  очень стабильна вследствие отрицательной обратной

связи между величинами  $D$  и  $h$ : случайное повышение (понижение)  $D$  уменьшает (увеличивает)  $h$  и эти величины возвращаются в исходное состояние.

## 2.1. Влияние геометрических параметров на НСД в ТВС

Влияние геометрических факторов проточных камер сгорания на НСД в ТВС в целом совпадает с тем, что наблюдалось в ТКС [5], а также при реализации детонационных процессов в камерах типа ЖРД. Существенное отличие состоит в том, что ТВС имеют меньшую химическую активность, поэтому их детонационное горение происходит в ПДВ укрупненной структуры. Это накладывает отпечаток на смесеобразование и взаимовлияние процессов в камере и системе подачи. Все экспериментальные данные по НСД в ТВС, описанные выше, свидетельствуют о том, что ПДВ в проточной кольцевой камере сгорания реализуются при условии, что высота слоя смеси  $h$  близка к критической  $h^*$  (минимальной), необходимой для распространения детонации. Процессу НСД, в том числе и в ТВС, присущи два характерных размера: высота слоя смеси  $h$ , по которому распространяется фронт ПДВ, и расстояние  $l$  между смежными ПДВ. Указанные размеры в зависимости от параметров подачи и вида ТВС могут меняться в широких пределах. Однако их отношение

$$K = l/h = \pi d_c/nh \quad (2)$$

приблизительно постоянно [5]. Анализ описанных выше экспериментальных данных по НСД в ТВС в проточных кольцевых цилиндрических камерах сгорания показал, что  $K = 3.5 \pm 0.5$ . Зная  $K$  из (2) для  $n = 1$ , можно оценить минимальный диаметр камеры сгорания  $d_{c,\min}$ :

$$d_{c,\min} = Kh/\pi. \quad (3)$$

Рассмотрим основные геометрические параметры проточных кольцевых цилиндрических камер сгорания: внешний диаметр  $d_c$ , ширину щели на входе  $\delta$ , ширину кольцевого канала  $\Delta$  и длину камеры  $L_c$ . Возможно, также изменение формы кольцевого канала камеры, например, его расширение.

**Диаметр камеры.** При сохранении удельного расхода воздуха через кольцевую щель

$g_\delta = G_a/S_\delta$ , степени расширения канала камеры  $\Delta/\delta$ , коэффициента избытка горючего  $\phi$  и при одинаковом качестве смешения ТВС увеличение диаметра камеры  $d_c$  в 2, 3 раза и т. д. по отношению к минимальному  $d_{c,\min}$  увеличивает количество ПДВ во столько же раз. При этом в установившемся процессе НСД  $h^* \leq h < 2h^*$ . Ясно, что необходимым условием реализации НСД в ТВС должно быть  $d_c > d_{c,\min}$ .

Для проверки геометрического подобия режимов НСД при увеличении диаметра камеры  $d_c$  были проведены специальные эксперименты в проточной кольцевой цилиндрической камере с параметрами  $d_c = 503$  мм,  $\delta = 3.5$  мм,  $\Delta = 18$  мм,  $L_c = 540$  мм. Для смеси синтез-газа составов  $\text{CO} + \text{H}_2$ ,  $\text{CO} + 2\text{H}_2$ ,  $\text{CO} + 3\text{H}_2$  с воздухом в диапазонах  $g_\delta = 100 \div 1694$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и  $\phi = 0.64 \div 1.52$  осуществлены многоволновые ( $n = 2 \div 4$ ) режимы НСД с частотой вращения ПДВ  $f = 1.14 \div 3.77$  кГц ( $D = 0.87 \div 1.51$  км/с). Установлено, что размер и структура ПДВ в исследованных ТВС близки к определенным ранее для смесей водород — воздух [10] и синтез-газ — воздух при  $d_c = 306$  мм [14].

Эффект геометрического подобия НСД для смеси  $\text{CO} + 3\text{H}_2$  — воздух иллюстрирует рис. 7, где изображены зависимости частоты вращения ПДВ от удельного расхода воздуха в камерах диаметром  $d_{c1} = 306$  мм и  $d_{c2} = 503$  мм.

Видно, что с ростом удельного расхода воздуха  $g_\delta$  частота вращения ПДВ монотонно увеличивается в диапазонах  $f = 1.32 \div 4.62$  кГц при  $d_{c1} = 306$  мм и  $f = 1.14 \div 3.77$  кГц при  $d_{c2} = 503$  мм. Скачком частоты  $f$  соответствует момент перехода от  $n$ -волнового режима НСД к  $(n + 1)$ -волновому. При этом минимальное ко-

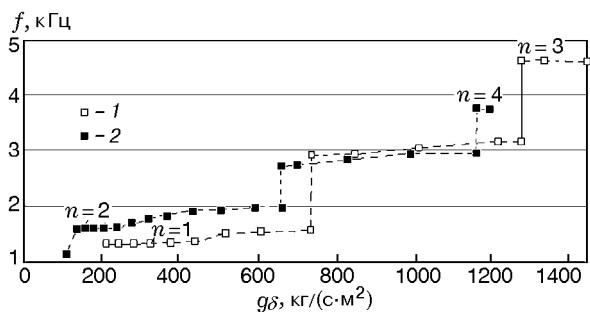


Рис. 7. Зависимость частоты ПДВ в смеси  $\text{CO} + 3\text{H}_2$  — воздух от удельного расхода воздуха через кольцевую щель:

1 —  $d_{c1} = 306$  мм, 2 —  $d_{c2} = 503$  мм



личество волн в камере  $d_{c1} = 306$  мм — одна, а в камере  $d_{c2} = 503$  мм — две. В области  $g_{\delta} = 750 \div 1\,150$  кг/(с·м<sup>2</sup>) частота ПДВ, а следовательно, и скорость НСД остаются примерно одинаковыми, а число волн пропорционально диаметру камер сгорания:  $d_{c2}/d_{c1} \approx n_2/n_1 = 3/2$ . То есть наблюдается геометрическое подобие процесса НСД.

**Длина камеры сгорания.** Как и для камер сгорания типа ЖРД [5], длина проточных камер сгорания типа ВРД должна коррелировать с высотой фронта ПДВ  $h$ , а именно для реализации устойчивой НСД достаточно камеры длиной  $L_c \approx (1.5 \div 2)h$ . Меньшая длина приводит к заметному влиянию разгрузки волны в стороны, сильному искривлению фронта и неравномерному полю течения продуктов из камеры. Большая длина камеры способствует росту тепловых и вязких потерь на стенках и, возможно, повышению энтропии. Для смесей  $C_2H_2$  — воздух параметры НСД в кольцевых цилиндрических камерах длиной  $L_c = 500$  и  $765$  мм (при  $\Delta = 23$  мм и прочих равных условиях) были близки. С уменьшением длины камеры до  $L_c = 300$  мм волны значительно ослабевали и принимали структуру типа II. При этом явно не выполнялось требование  $L_c \geq 1.5h$ . Аналогично для смесей  $H_2$  — воздух в камере длиной  $L_c = 175$  мм ( $L_c \approx 1.5h$ ) осуществлялась очень устойчивая НСД ( $D = 1.48 \rightarrow 1.37$  км/с,  $n = 2$  при  $\phi = 1.2 \rightarrow 0.94$ ). Уменьшение длины камеры до  $L_c = 90$  мм приводило к нестабильности ПДВ, понижению полного давления на выходе из камеры и сужению пределов НСД по коэффициенту избытка горючего  $\phi$ . Поскольку высота фронта ПДВ  $h$  уменьшается с ростом давления в камере, длины камеры  $L_c = 90$  мм становилось достаточно для реализации устойчивой НСД при давлении  $p_c = 4 \cdot 10^5$  Па, когда  $h \approx 60$  мм [18].

**Ширина щели подачи воздуха.** Исследование влияния параметра  $\delta$  проведено в опытах в камере ДК 300 размеров  $L_c = 665$  мм,  $\Delta = 23$  мм с горючими водород (форсунки F1 и F2) и ацетилен (форсунка F1). В экспериментах ширина кольцевой щели подачи воздуха  $\delta$ , а следовательно, и площадь проходного сечения щели на входе в камеру сгорания  $S_{\delta}$  изменялись в 10 раз. Обобщающие зависимости частоты реализованных ПДВ от удельного расхода воздуха через кольцевую щель  $g_{\delta} = G_a/S_{\delta}$  для смеси  $H_2$  — воздух при варьировании параметра  $\delta$  представлены на рис. 8, а для смеси  $C_2H_2$  —

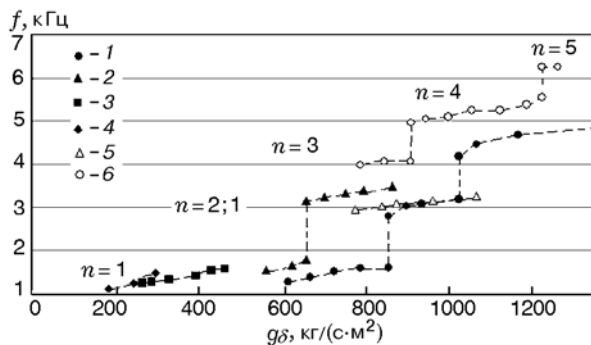


Рис. 8. Зависимости частоты ПДВ в водородовоздушной смеси от удельного расхода воздуха через кольцевую щель:

форсунка F2;  $\delta$ , мм: 1 — 2, 2 — 3, 3 — 6, 4 — 10, 5 — 3.17 [13], 6 — 2;  $G_{a2} > 0$ ,  $\alpha = 1.1 \rightarrow 0.92$ ,  $L_c = 870$  мм,  $L_{a2} = 270$  мм

воздух — на рис. 9. Отметим, что, зная частоту вращения ПДВ  $f$ , можно по формуле (1) определить скорость непрерывной детонации  $D$ .

Для смеси  $H_2$  — воздух в исследованном диапазоне входных параметров реализована НСД с частотой ПДВ в диапазоне  $f = 1.15 \div 4.76$  кГц (см. рис. 8). Видно, что с увеличением ширины щели  $\delta$  область начала реализации НСД по удельному расходу  $g_{\delta}$  монотонно уменьшается. Так, при  $\delta = 1$  мм  $g_{\delta, \min} = 1872$  кг/(с·м<sup>2</sup>) (на рис. 8 не показано), а при  $\delta = 10$  мм  $g_{\delta, \min} = 175$  кг/(с·м<sup>2</sup>), т. е. рост параметра  $\delta$  в 10 раз приводит примерно к такому же уменьшению  $g_{\delta, \min}$ . При фиксированном значении  $\delta$  с ростом параметра  $g_{\delta}$  частота вращения ПДВ увеличивается. Причем скачки в частоте соответствуют изменению числа ПДВ, размещающихся по периметру камеры сгорания. Так, при  $\delta = 2$  мм (кривая 1) одноволновый режим НСД начинает наблюдаться при  $g_{\delta} = g_{\delta, \min} = 613$  кг/(с·м<sup>2</sup>) с частотой вращения ПДВ  $f = 1.27$  кГц. С ростом  $g_{\delta}$  в диапазоне  $613 < g_{\delta} < 853$  кг/(с·м<sup>2</sup>) частота ПДВ монотонно увеличивается до 1.6 кГц. При  $g_{\delta} = 853$  кг/(с·м<sup>2</sup>) из-за перестройки течения в камере и формирования двухволнового режима НСД происходит скачок частоты до значения  $f = 2.78$  кГц. В диапазоне  $853 < g_{\delta} < 1021$  кг/(с·м<sup>2</sup>) частота ПДВ монотонно растет до  $f = 3.2$  кГц. При  $g_{\delta} = 1021$  кг/(с·м<sup>2</sup>) снова происходит перестройка течения, формируется трехволновый режим НСД и наблюдается очередной скачок частоты до  $f = 4.17$  кГц с последующим ее увеличением при росте  $g_{\delta}$ . Из-за

технических ограничений экспериментального стенда по максимальным значениям расходов воздуха  $G_a$  и горючего  $G_f$  при  $\delta = 1$  мм (на рис. 8 не показано) и  $\delta = 3$  мм (кривая 2) с ростом удельного расхода воздуха  $g_\delta$  удалось достигнуть двухволновых режимов НСД, а при  $\delta = 6$  мм (кривая 3) и 10 мм (кривая 4) — только одноволновых.

Для сравнения на рис. 8 нанесены экспериментальные данные по одноволновому режиму НСД [13] (кривая 5) в смеси  $H_2$  — воздух в камере диаметром  $d_c = 152$  мм с кольцевой щелью для воздуха шириной  $\delta = 3.17$  мм и форсункой под горючее с 80 отверстиями, каждое диаметром 2.54 мм. Видно, что данные [13] хорошо коррелируют с нашими экспериментальными данными при  $\delta = 2$  мм (кривая 1), а для форсунки F1 — и при  $\delta = 3$  мм [5]. Действительно, в камере ДК 300 при  $\delta = 3$  мм и форсунке F1 переход от одноволнового режима НСД к двухволновому осуществляется при  $g_\delta \approx 760$  кг/(с·м<sup>2</sup>) с частотой вращения ПДВ  $f \approx 2.9$  кГц, а в камере ДК 152 при  $\delta = 3.17$  мм [13] одноволновый режим НСД зарегистрирован при минимальном значении  $g_\delta \approx 774$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и частоте вращения ПДВ  $f \approx 2.95$  кГц (кривая 5). Провести прямое сравнение с данными [12] не удалось из-за отсутствия в указанной работе значений расходов смеси  $H_2$  — воздух, при которых были выполнены эксперименты.

Представленные на рис. 8 экспериментальные данные позволяют однозначно описать следующие закономерности зарождения и протекания процесса НСД смеси  $H_2$  — воздух при варьировании параметра  $g_\delta$ . При фиксированной ширине щели  $\delta$  существует минимальное значение удельного расхода воздуха  $g_{\delta, \min}$ , при котором формируется одноволновый режим НСД. С увеличением  $g_\delta$  режим НСД эволюционирует по схеме  $(n = 1) \rightarrow (n = 2) \rightarrow (n = 3) \rightarrow$  и т. д. Данные рис. 8, в частности, позволяют оценивать минимальный диаметр камеры сгорания  $d_{c, \min}$ , который зависит от удельного расхода воздуха  $g_\delta$ , геометрии отверстий форсунки и степени расширения камеры сгорания. Например, при  $\delta = 2$  мм и форсунке F2 получаем:  $d_{c, \min} \approx 300$  мм при  $g_{\delta, \min} \geq 613$  кг/(с·м<sup>2</sup>);  $d_{c, \min} \approx 150$  мм при  $g_{\delta, \min} \geq 853$  кг/(с·м<sup>2</sup>);  $d_{c, \min} \approx 100$  мм при  $g_{\delta, \min} \geq 1021$  кг/(с·м<sup>2</sup>). Эти оценки  $d_{c, \min}$ , сделанные на основе результатов наших экспериментов в камере ДК 300, коррелируют с данными [12, 13].

Зависимости частоты вращения реализованных ПДВ от параметра  $g_\delta$  для смеси  $C_2H_2$  — воздух представлены на рис. 9 для ряда значений  $\delta$  (кривые 1–3). Видно, что в смеси  $C_2H_2$  — воздух, аналогично смеси  $H_2$  — воздух, при фиксированном значении параметра  $\delta$  с ростом удельного расхода воздуха через щель  $g_\delta$  растет частота вращения ПДВ в диапазоне  $f = 1.16 \div 1.56$  кГц. Причем минимальные значения удельного расхода воздуха  $g_{\delta, \min}$ , характеризующие начало реализации НСД, сильно зависят от параметра  $\delta$ . При  $\delta = 10$  мм  $g_{\delta, \min} = 116$  кг/(с·м<sup>2</sup>) (неустойчивая НСД наблюдалась даже при  $f \approx 0.9$  кГц [5]), а при  $\delta = 1$  мм (на рис. 9 не показано)  $g_{\delta, \min} = 2350$  кг/(с·м<sup>2</sup>).

Из рис. 9 также следует, что более сильные ПДВ (с большей частотой вращения и скоростью НСД) реализуются при истечении воздуха в камеру сгорания через щели шириной  $\delta = 2$  и 3 мм. Качество волн практически не нарушается даже при докритическом истечении воздуха из щели. Так, истечение воздуха через зазор  $\delta = 10$  мм было докритическим в течение всего времени наблюдения процесса. Это не мешало формированию ПДВ при наименьшем значении  $g_{\delta, \min} = 116$  кг/(с·м<sup>2</sup>). Заметим, что в исследованном диапазоне удельных расходов удалось получить только одноволновые режимы НСД в смеси  $C_2H_2$  — воздух.

Для сравнения на рис. 9 представлены также зависимости частоты ПДВ от удельного расхода воздуха  $g_\delta$  для смеси  $CO/H_2$  — воздух ( $\delta = 3$  мм,  $\Delta = 16.5$  мм,  $L_c = 525$  мм). Хорошо видно, что с ростом  $g_\delta$  частота вра-

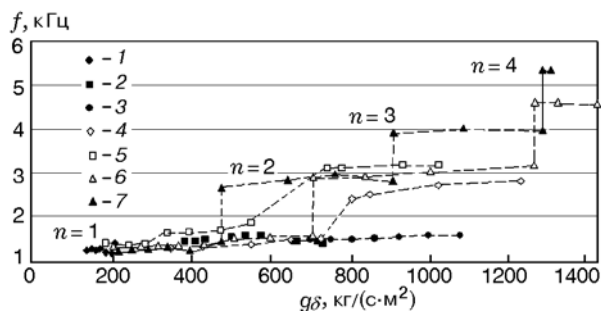


Рис. 9. Зависимости частоты ПДВ в различных ТВС от удельного расхода воздуха через кольцевую щель:

$C_2H_2$  — воздух,  $\delta$ , мм: 1 — 10, 2 — 3, 3 — 2;  $CO/H_2$  — воздух,  $\delta = 3$  мм: 4 —  $CO + H_2$ , 5 —  $CO + 2H_2$ , 6 —  $CO + 3H_2$ ,  $G_{a2} = 0$ , 7 —  $CO + 3H_2$ ,  $G_{a2} > 0$ ;  $L_c = 525$  мм,  $L_{a2} = 370$  мм

щения ПДВ, как правило, монотонно увеличивается. Интересно отметить, что для горючего  $\text{CO}/\text{H}_2$  картина перехода на двухволновый режим НСД зависит от состава синтез-газа. Так, для состава  $\text{CO} + \text{H}_2$  в диапазоне расходов  $738 < g_\delta < 817 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  и для состава  $\text{CO} + 2\text{H}_2$  в диапазоне  $560 < g_\delta < 755 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  наблюдали в течение десятков миллисекунд «конкуренцию» между одноволновыми и двухволновыми режимами НСД. В то же время для состава  $\text{CO} + 3\text{H}_2$  переход от одноволнового к двухволновому детонационному режиму происходил быстро, на нескольких оборотах ПДВ ( $\Delta t \approx 2 \text{ мс}$ ) при  $g_\delta = 720 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ , что на рис. 9 (кривая 6) отмечено скачком частоты ПДВ от 1.57 до 2.9 кГц. Выявлена следующая закономерность: с увеличением параметра  $g_\delta$  число ПДВ увеличивается сначала для синтез-газа, содержащего в составе большую долю водорода. Для состава  $\text{CO} + 3\text{H}_2$  при  $g_\delta = 1280 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  зарегистрирован переход на трехволновый ( $n = 2 \rightarrow 3$ ) режим НСД с частотой  $f = 4.62 \text{ кГц}$  (кривая 6 на рис. 9).

Итак, для исследованных ТВС с увеличением ширины щели подачи воздуха уменьшается нижний предел  $g_{\delta, \text{min}}$  для реализации НСД.

**Ширина кольцевого канала.** Ширина канала камеры варьировалась в диапазоне  $\Delta = 7 \div 38 \text{ мм}$  и всегда превышала критическое значение для распространения классической детонации в плоских каналах ( $\Delta^*$ ) [15]. При реализуемых расходах воздуха и горючего сужение канала камеры сгорания  $\Delta$  приводило к росту удельного расхода смеси  $g_\Sigma$ , увеличению давления в камере и способствовало развитию НСД. Это выражалось в уменьшении высоты фронта ПДВ  $h$  и связанной с ним минимальной длины камеры, а также в снижении нижнего концентрационного предела по  $\phi$ . Так, в камере с  $\Delta = 7 \text{ мм}$  и системой подачи, включающей в себя щель шириной  $\delta = 2 \text{ мм}$  и форсунку F1, наблюдали устойчивые сильные ПДВ в смеси  $\text{H}_2$  — воздух ( $D = 1.53 \rightarrow 1.2 \text{ км}/\text{с}$ ,  $n = 3$ ) при  $p_c = (12.3 \rightarrow 9.2) \cdot 10^5 \text{ Па}$  и  $\phi = 0.65 \rightarrow 0.4$ . Нижнее значение  $\phi$  меньше предельного  $\phi = 0.5$ , полученного нами при  $p_c = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . При этом в испытываемых проточных камерах достигнуты рекордные значения удельного расхода смеси —  $g_\Sigma = 1510 \rightarrow 1205 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ . Длина камеры, равная  $L_c = 150 \text{ мм}$ , могла быть уменьшена до 100 мм. Реализации НСД способствовало отсутствие влияния давления в камере на расход,

поскольку он лимитировался площадью сечения подводящего трубопровода.

Напротив, увеличение ширины канала до  $\Delta = 38 \text{ мм}$  значительно снижало удельный расход смеси и, как следствие, уменьшало давление в камере до  $p_c = (1.3 \div 1.2) \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Это приводило к вырождению детонационных волн (тип II, см. рис. 2, б) и сильному влиянию внешнего противодействия на процессы в камере (появление скачка уплотнения в камере, тормозящего поток продуктов). Очевидно, существует предельное значение  $\Delta_{\text{min}}$ , при котором невозможна НСД по причинам, рассмотренным в [15].

## 2.2. Влияние физических и химических параметров на НСД в ТВС

**Смесеобразование.** К смесеобразованию ТВС предъявляются те же требования, что и для камер типа ВРД с подачей кислорода в качестве окислителя [5].

**Удельный расход ТВС.** Влияние этого фактора такое же, как и в камерах типа ЖРД и ВРД при использовании ТКС. Поскольку в ТВС детонационные волны имеют структуры I и II (см. рис. 2), увеличение удельного расхода смеси (как следствие, давления в камере) расширяло область существования детонационных волн типа I. При этом скорость ПДВ, как правило, также возрастала (для смеси  $\text{H}_2$  — воздух максимально до 1.58 км/с). С уменьшением удельного расхода смеси увеличивался критический размер поперечного фронта  $h^*$ , структура волн укрупнялась, а их количество уменьшалось.

**Противодавление.** Действию этого физического параметра сопутствуют явления, рассмотренные выше. При детонационном сжигании ТВС истечение продуктов происходило в атмосферу, поэтому влияние противодействия наблюдалось только при низком удельном расходе смеси, когда скачок уплотнения в продуктах проникал в камеру и даже в область смесеобразования. В последнем случае при отражении скачка уплотнения от торца камеры происходило воспламенение смеси или появлялась детонационная волна, продольная или спиновая. Иногда скачок уплотнения при входе в зону смесеобразования становился продольным детонационным, т. е. существенно изменял структуру ПДВ. При входе скачка уплотнения в канал скорость продуктов снижалась.

**Соотношение компонентов смеси.** При реализации НСД в ТВС пределы детонации по коэффициенту  $\phi$  заметно сдвинуты в сторону богатых смесей. В диапазоне указанных выше удельных расходов компонентов, геометрий камер и форсунок горючего найдены значения  $\phi$ , которые можно считать предельными для существования НСД. В смеси  $C_2H_2$  — воздух ( $\delta = 2$  мм, форсунка F1) нижний предел составил  $\phi_{\min} = 0.6$  ( $g_{\Sigma} = 135$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $p_c = 1.6 \cdot 10^5$  Па). С увеличением в экспериментах параметра  $\phi$  до 1.37 наблюдалась устойчивая НСД. При  $\phi > 1.37$  ( $g_{\Sigma} = 210$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $p_c = 2.8 \cdot 10^5$  Па) эксперименты не проводились. Однако есть основания считать, что НСД будет существовать и при более высоких значениях  $\phi$ , поскольку для классической детонации ацетиленовоздушных смесей в трубах достигнуто значение  $\phi = 6.4$  [19].

При детонационном сжигании смеси  $H_2$  — воздух ( $\delta = 3$  мм, форсунка F1) достигнут верхний концентрационный предел  $\phi_{\max} = 2.87$  ( $g_{\Sigma} = 130$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $p_c = 2 \cdot 10^5$  Па) и нижний  $\phi_{\min} = 0.63$  ( $g_{\Sigma} = 66$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $p_c = 1.2 \cdot 10^5$  Па). Установлено, что диапазон  $\phi$  расширяется с улучшением смесеобразования (форсунка F2), увеличением удельных расходов смеси и перепада давления на щели подачи воздуха (уменьшением  $\delta$  до оптимальной величины). Например, при использовании форсунки горючего F2 ( $\delta = 2$  мм,  $g_{\Sigma} = 156$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $p_c = 1.4 \cdot 10^5$  Па) получен нижний предел  $\phi_{\min} \approx 0.5$ . Вне указанных пределов по  $\phi$  реализовывались неустойчивые детонационные режимы с преобладанием обычного турбулентного горения.

При детонационном сжигании смеси  $CO/H_2$  — воздух ( $\delta = 3$  мм, форсунка F3) концентрационные пределы [14] составили: нижний  $\phi_{\min} = 0.53$ , верхний  $\phi_{\max} = 2.7$ . Эти граничные значения примерно одинаковы для всех трех составов синтез-газа.

**Добавочная подача воздуха.** Одним из путей повышения экономичности, экологичности и надежности ВРД и энергетических установок является использование добавочного воздуха в рабочем цикле — его подмешивание в продукты сгорания. Для выяснения влияния добавки воздуха в продукты детонации на процесс НСД, на область ее реализации, на потери полного давления в камере и на величину удельного импульса была проведена серия экспериментов с использованием смесей  $H_2$  — воздух

и  $CO/H_2$  — воздух. Добавочная подача холодного воздуха в камеру осуществлялась на расстоянии  $L_{a2} = 270, 150$  или  $90$  мм (см. рис. 1) через форсунку типа F1 с равномерно расположенными отверстиями по внутренней стенке камеры перпендикулярно потоку продуктов.

В опытах со смесью  $H_2$  — воздух [18] ( $d_c = 306$  мм,  $\delta = 2$  мм,  $\Delta = 23$  мм, форсунка F2,  $L_c = 175 \div 870$  мм) отношение добавочного расхода воздуха  $G_{a2}$  к основному  $G_{a1}$  варьировалось в диапазоне  $\alpha = G_{a2}/G_{a1} = 0.14 \div 3.3$ , а общий коэффициент избытка горючего составлял  $\phi_{\Sigma} = \phi/(1 + \alpha) = 0.28 \div 1.0$ . Типичная зависимость частоты ПДВ от удельного расхода воздуха через кольцевую щель при  $G_{a2} > 0$ ,  $L_c = 870$  мм,  $L_{a2} = 270$  мм приведена рис. 8 (кривая б). Видно, что добавочная подача воздуха во вторую половину камеры сгорания не только не препятствовала формированию НСД, но и приводила к увеличению числа ПДВ и частоты их вращения. Так, согласно данным рис. 8 в диапазоне  $g_{\delta} = 1220 \div 1256$  кг/(с·м<sup>2</sup>),  $\alpha = 1.1$  реализовано максимальное число ПДВ  $n = 5$  с частотой  $f = 6.25$  кГц. Без дополнительной подачи воздуха ( $\alpha = 0$ ) при таком же значении  $g_{\delta}$  (кривая 1) реализуются только три ПДВ с частотой  $f = 4.7$  кГц. Установлено, что давление в камере сгорания возрастало с увеличением  $\alpha$ . Устойчивый режим НСД реализован при  $\alpha < 2.65$ . При  $2.65 < \alpha < 2.8$  наблюдались нестабильные ПДВ на фоне обычного горения, а при  $\alpha > 2.8$  — обычное горение.

Типичная зависимость частоты ПДВ от удельного расхода воздуха для смеси  $CO + 3H_2 +$  воздух при  $G_{a2} > 0$ ,  $L_c = 525$  мм,  $L_{a2} = 370$  мм приведена на рис. 9 (кривая 7). Видно, что число ПДВ также увеличивается (максимальное число ПДВ  $n = 4$  с частотой  $f = 5.37$  кГц реализовано при  $g_{\delta} = 1320$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и  $\alpha = 1.02$ ), однако их скорость уменьшается. Отметим, что в данном эксперименте коэффициент  $\alpha$  значительно изменялся в течение опыта:  $\alpha = 1.02 \rightarrow 0.19$  при  $g_{\delta} = 1320 \rightarrow 500$  кг/(с·м<sup>2</sup>). Поэтому при  $n = 1$  кривые 7 и б сближаются.

В экспериментах наряду с измерением полного давления воздуха в коллекторе основной подачи  $p_{m,a1}$  измерялось полное давление продуктов на выходе из камеры  $p_{ex0}$ , которое является важной интегральной характеристикой процесса. Обобщающие зависимости отношения этих величин  $p_{ex0}/p_{m,a1}$  от удельного расхода воздуха для смесей  $H_2$  — воздух и  $CO/H_2$  — воздух приведены на рис. 10. Здесь

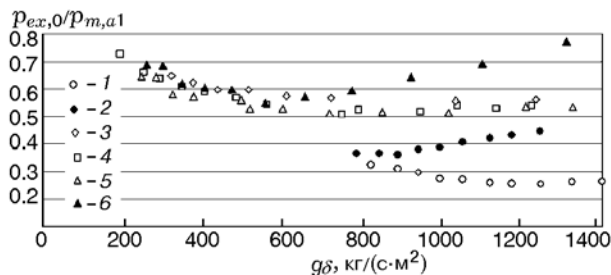


Рис. 10. Зависимости  $p_{ex0}/p_{m,a1}$  при НСД от удельного расхода воздуха:

$H_2$  — воздух ( $\delta = 2$  мм, форсунка F2,  $\Delta = 23$  мм): 1 —  $G_{a2} = 0$ , 2 —  $G_{a2} > 0$ ,  $\alpha = 1.1 \rightarrow 0.92$ ;  $CO/H_2$  — воздух ( $\delta = 3$  мм, форсунка F3,  $\Delta = 16.5$  мм) при  $G_{a2} = 0$ : 3 —  $CO + H_2$ , 4 —  $CO + 2H_2$ , 5 —  $CO + 3H_2$ ; при  $G_{a2} > 0$ ,  $\alpha = 1.02 \rightarrow 0$  ( $g_\delta = 1320 \rightarrow 350$  кг/(с·м<sup>2</sup>)): 6 —  $CO + 3H_2$

представлены результаты тех же опытов по реализации НСД, что и на рис. 8, 9.

Видно, что при  $G_{a2} = 0$  и критическом истечении продуктов из камеры устанавливается примерно одинаковое отношение  $p_{ex0}/p_{m,a1}$ : 0.27 для водорода при  $g_\delta > 1200$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и  $0.53 \pm 0.03$  при  $g_\delta > 500$  кг/(с·м<sup>2</sup>) для всех трех составов синтез-газа. Это говорит, во-первых, о прямо пропорциональной зависимости величин  $p_{ex0}$  и  $p_{m,a1}$ , во-вторых, о значительных потерях полного давления на щели подачи воздуха, в детонационных и ударных скачках, процессах перемешивания и трения на стенках камеры сгорания. Видно, что потери тем больше, чем больше коэффициент расширения камеры сгорания  $K_S = S_c/S_\delta$ . Для водорода (кривые 1, 2 на рис. 10)  $K_S = 10.7$ , а для синтез-газа (кривые 3–6)  $K_S = 5.255$ . Оценки показывают, что для водорода при  $K_S = 5.25$  (как и в опытах с синтез-газом) отношение  $p_{ex0}/p_{m,a1} \approx 0.5$ . То есть при одинаковых значениях  $K_S$  потери практически не зависят от состава исследованных ТВС. При входе скачка уплотнения в камеру сгорания давление торможения уменьшается медленнее, чем давление в коллекторе воздуха, поэтому отношение  $p_{ex0}/p_{m,a1}$  возрастает. Принципиально важно, что при  $G_{a2} > 0$  отношение  $p_{ex0}/p_{m,a1}$  также растет. Так, для смеси  $H_2$  — воздух при  $\alpha = 1.09$  (кривая 2) это отношение увеличилось в 1.7 раза, достигнув значения  $p_{ex0}/p_{m,a1} \approx 0.434$ , а для смеси  $CO + 3H_2$  — воздух при  $\alpha = 1.02$  (кривая 6) — в 1.5 раза, достигнув значения  $p_{ex0}/p_{m,a1} \approx 0.78$ . И это не предел. В некоторых экспериментах с этой же смесью при  $\alpha =$

2.5 реализована НСД при  $p_{ex0}/p_{m,a1} \approx 1$ . Увеличение параметра  $\alpha$  удалось достичь уменьшением расхода воздуха в основной и увеличением в добавочной подаче. В этом случае  $p_{m,a1} \approx p_{ex0} = 3.2 \cdot 10^5$  Па, статическое давление в камере  $p_{c1} = 2.73 \cdot 10^5$  Па, а в камере сгорания наблюдали четыре устойчивые ПДВ, движущиеся со скоростью  $D = 1.265$  км/с. Следует отметить, что эти результаты получены в короткой камере,  $L_c = 155$  мм.

**Удельные импульсы.** Подвод дополнительной массы газа в поток равносителен сужению проходного сечения трубок тока, а устройство, производящее такое воздействие, называется «полумассовым» соплом [20]. Определим влияние добавки воздуха в продукты НСД на удельный импульс камеры сгорания. Сила тяги определяется формулой [21]

$$F = \int_S [p + \rho v^2 - p_a] dS = (p_{ex0} - p_a) S_c, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность,  $v$  — скорость,  $p_a$  — противодавление,  $dS$  — площадь элементарной трубки тока. Измеряя давление торможения  $p_{ex0}$  на выходе из камеры, можно определить силу тяги  $F$  и удельный импульс относительно расхода горючего:  $I_{sp,f} = (p_{ex0} - p_a) \cdot S_c / G_f$ .

На рис. 11 для смесей  $H_2$  — воздух и  $CO + 3H_2$  — воздух представлены зависимости удельного импульса относительно расхода горючего  $I_{sp,f}$  при НСД от удельного расхода воздуха через щель  $g_\delta$  при истечении продуктов детонации в атмосферу, это результа-

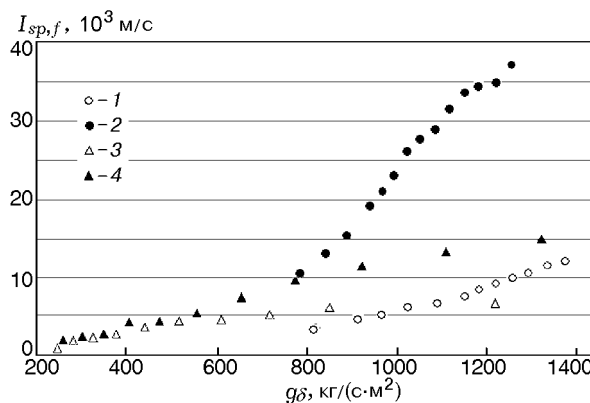


Рис. 11. Зависимости удельного импульса при НСД от удельного расхода воздуха:

$H_2$  — воздух: 1 —  $G_{a2} = 0$ , 2 —  $G_{a2} > 0$ ,  $\alpha = 1.1 \rightarrow 0.92$ ;  $CO + 3H_2$  — воздух: 3 —  $G_{a2} = 0$ , 4 —  $G_{a2} > 0$ ,  $\alpha = 1.02 \rightarrow 0$  ( $g_\delta = 1320 \rightarrow 350$  кг/(с·м<sup>2</sup>))

ты тех же опытов по реализации НСД, что и на рис. 8–10.

Видно, что с увеличением параметра  $g_\delta$  удельные импульсы  $I_{sp,f}$  для исследованных ТВС монотонно растут. При  $G_{a2} = 0$  (кривые 1 и 3 на рис. 11) и наибольших значениях  $g_\delta$  удельные импульсы для смеси  $H_2$  — воздух почти вдвое больше, чем для смеси  $CO + 3H_2$ . Заметим, что согласно экспериментальным данным для составов  $CO + 2H_2$  и  $CO + H_2$  это различие еще больше. Установлено, что при  $G_{a2} > 0$  удельные импульсы увеличиваются для всех смесей. Так, при наибольших значениях  $g_\delta$  ( $\alpha = 1.1$ ) для смеси  $H_2$  — воздух (кривая 2)  $I_{sp,f} \approx 37 \cdot 10^3$  м/с, что почти в четыре раза больше, чем при  $\alpha = 0$  (кривая 1). При наибольших значениях  $g_\delta$  ( $\alpha = 1.02$ ) для смеси  $CO + 3H_2$  — воздух (кривая 4)  $I_{sp,f} = 15 \cdot 10^3$  м/с, что почти в два раза больше, чем при  $\alpha = 0$  (кривая 3). С уменьшением параметра  $\alpha$ , а также при докритическом истечении продуктов из камеры значения  $I_{sp,f}$  уменьшаются и для всех смесей приближаются к нулю при  $g_\delta \rightarrow 0$ .

Относительно удельных импульсов  $I_{sp,f}$  для смесей синтез-газа с воздухом следует сделать одно замечание. В реальных системах синтез-газ будет генерироваться в специальном устройстве перед камерой сгорания в результате предварительной конверсии исходного углеводородного топлива. Поэтому, строго говоря, необходимо рассчитывать удельный импульс не на расход синтез-газа, а на расход исходного углеводородного топлива. Последнее означает, что значения удельных импульсов для составов смеси  $CO + 3H_2$  — воздух, представленных на рис. 11 (кривые 3, 4), нужно увеличить в 1.889 раза, чтобы получить значение удельного импульса  $I_{sp,f}$  относительно расхода исходного углеводородного топлива. Для состава  $CO + 2H_2$  — воздух коэффициент увеличения равен 2, а для состава  $CO + H_2$  — воздух — 2.143.

Таким образом, при реализации НСД в ТВС добавочная подача воздуха во вторую половину кольцевой камеры сгорания, по крайней мере до значений  $\alpha \approx 2.5$ , при которых в экспериментах реализована НСД, является эффективным средством увеличения полного давления в камере и удельного импульса, уменьшения температуры продуктов и коэффициента избытка горючего на выходе из камеры.

**Область реализованных режимов непрерывной детонации.** Представляет интерес обобщение экспериментальных данных по реализации НСД с целью построения области существования НСД в обобщающих координатах. В проточной кольцевой камере сгорания фиксированного диаметра  $d_c = 306$  мм, длиной  $L_c = 500 \div 885$  мм, с форсунками горючего F1, F2 и F3 в широких пределах варьировались ширина кольцевой щели подачи воздуха  $\delta$ , ширина канала камеры  $\Delta$  и удельный расход воздуха через щель  $g_\delta$ .

Параметры потока воздуха, втекающего через щель в камеру, зависят от коэффициента расширения камеры сгорания  $K_S = S_c/S_\delta$ . Рассмотрим его в качестве определяющего параметра при анализе экспериментальных данных по НСД в ТВС. В этом случае область реализации НСД является функцией трех независимых параметров  $K_S$ ,  $\phi$  и  $g_\delta$ . Области реализации НСД в проточной кольцевой камере сгорания диаметром  $d_c = 306$  мм в координатах  $(\phi, g_\delta)$  при двух значениях параметра  $K_S$  для смесей  $C_2H_2$  — воздух,  $H_2$  — воздух и  $CO/H_2$  — воздух представлены на рис. 12.

Ниже и левее штриховой кривой детонационные режимы не наблюдались (обычное горение). Верхние пределы по удельному расходу

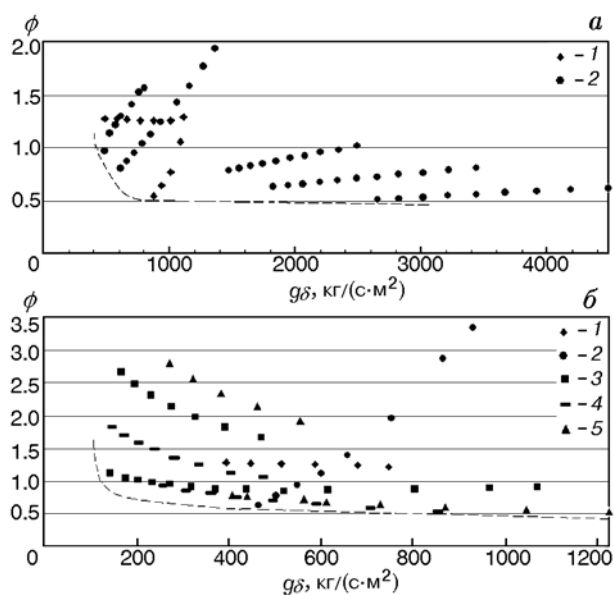


Рис. 12. Область реализации НСД в координатах  $(g_\delta, \phi)$ :

$a$  —  $K_S = 10.7$  ( $\delta = 2$  мм,  $\Delta = 23$  мм),  $b$  —  $K_S = 7.16$  ( $\delta = 3$  мм,  $\Delta = 23$  мм); 1 —  $C_2H_2$ , 2 —  $H_2$ , 3 —  $CO + H_2$ , 4 —  $CO + 2H_2$ , 5 —  $CO + 3H_2$

ду  $g_\delta$  оказались недостижимыми для имеющейся экспериментальной установки. Однако можно утверждать, что все режимы НСД, ограниченные снизу штриховой кривой и границами рамок (правый верхний угол), осуществимы. При  $g_\delta > 600 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  проявляется нижний предел по коэффициенту избытка горючего —  $\phi \approx 0.5$ . Он слабо уменьшается с ростом  $g_\delta$ . Видно, что с уменьшением параметра  $K_S$  левая граница области реализации НСД расширяется по удельному расходу воздуха через кольцевую щель. Область реализации НСД для синтез-газа сдвинута влево (до меньших значений  $g_\delta$ ) относительно водорода и ацетилена по той причине, что ТВС с этими горючими в данной области не исследовались. С дальнейшим уменьшением параметра  $K_S$  граница по  $g_\delta$  сдвигается левее, например, при  $K_S = 2.65$  ( $\delta = 6 \text{ мм}$ ,  $\Delta = 16.5 \text{ мм}$ ) для синтез-газа состава  $\text{CO} + 3\text{H}_2$  — до  $g_\delta = 100 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ . Отметим, что область реализации НСД в проточной камере сгорания построена для холодного воздуха и холодного горючего ( $T_0 = 300 \text{ К}$ ), истекающих из ресивера. В реальном ВРД воздух на входе в камеру нагрет до  $500 \text{ К}$  и более. Поэтому область реализации НСД будет несколько иная, возможно расширенная по минимальным значениям  $g_\delta$  и  $\phi$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования НСД в проточных кольцевых камерах сгорания для классических ТВС  $\text{C}_2\text{H}_2$  — воздух,  $\text{H}_2$  — воздух,  $\text{CO}/\text{H}_2$  — воздух позволяют считать, что сделаны первые шаги по созданию научных основ НСД для широкого класса представляющих практический интерес ТВС, необходимых при разработке технологий реализации детонационного цикла в ВРД. Установлено, что нет принципиальных физических ограничений для реализации НСД в более труднодетонируемых ТВС, в частности керосин — воздух. Существуют только технические причины, связанные с увеличением диаметра камеры. Перспективным, по нашему мнению, является конверсия труднодетонируемых горючих в легкодетонируемые (типа синтез-газа).

К настоящему времени достоверно установлено, что НСД инициируется один раз и существует непрерывно, пока в камеру сгорания подается ТВС. НСД является высокочастотным процессом ( $1 \div 6 \text{ кГц}$ ), существует в широ-

ком диапазоне определяющих параметров, обладает эффектом масштабируемости, допускает уменьшение длины камеры до размера детонационного фронта. За счет подачи дополнительного воздуха в камеру возможно уменьшение концентрации горючего до четырех раз по сравнению со стехиометрией при одновременном повышении удельного импульса, снижение температуры продуктов на выходе из камеры сгорания.

Для реализации в проточных кольцевых камерах сгорания НСД в ТВС необходимо знать рациональные области ее применения и возможности оптимизации, а также степень преимущества НСД по сравнению с обычным горением. При конструировании камер детонационного сгорания нужно учитывать: критический диаметр камеры для конкретной ТВС; нижнюю и верхнюю границы области реализации НСД по определяющим параметрам; пути достижения устойчивого детонационного режима с минимальными потерями полного давления продуктов сгорания.

Полученные к настоящему времени фундаментальные научные знания о непрерывных детонационных процессах в водородных и углеводородных горючих позволяют говорить о возможности и целесообразности их применения в воздушно-реактивных детонационных двигателях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // Журн. техн. физики. — 1940. — Т. 10, вып. 17. — С. 1453–1461.
2. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 129, № 6. — С. 1254–1256.
3. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective // Prog. Energy Combust. Sci. — 2004. — V. 30. — P. 545–672.
4. Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F. Continuous spin detonations // J. Propul. Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1204–1216.
5. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
6. 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.

7. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная детонация дозвукового потока топлива // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 3. — С. 93–104.
8. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Реализация и моделирование непрерывной спиновой детонации водородокислородной смеси в камерах проточного типа. 1. Камеры кольцевой цилиндрической геометрии // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 111–123.
9. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Спиновая детонация топливно-воздушной смеси в цилиндрической камере // Докл. АН. — 2005. — Т. 400, № 3. — С. 338–340.
10. **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.
11. **Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F.** Detonation combustion of the synthesis gas // Nonequilibrium Processes in Plasma, Combustion and Atmosphere / A. M. Starik, S. M. Frolov (Eds). — Moscow: Torus press Ltd, 2012. — P. 354–359.
12. **Kindracki J., Kobiera A., Wolanski P., et al.** Experimental and numerical study of the rotating detonation engine in hydrogen-air mixtures // Prog. Propul. Phys. — 2011. — V. 2. — P. 555–582.
13. **Shank J. C.** Development and testing of a rotating detonation engine run on hydrogen and air // AFIT/GAE/ENY/12-M36: Thesis. — 2012.
14. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация смесей синтез-газ — воздух // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 4. — С. 60–67.
15. **Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчян М. Е.** Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
16. **Васильев А. А., Митрофанов В. В., Топчян М. Е.** Детонационные волны в газах // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 109–131.
17. **Austin J. M., Shepherd J. E.** Detonations in hydrocarbon fuel blends // Combust. Flame. — 2003. — V. 132, N 1-2. — P. 73–90.
18. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация водородовоздушной смеси с добавкой воздуха в продукты и зону смесеобразования // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 60–68.
19. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1968.
20. **Феодосьев В. И.** Основы техники ракетного полета. — М.: Наука, 1979.
21. **Зуев В. С., Макарон В. С.** Теория прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей. — М.: Машиностроение, 1971.

*Поступила в редакцию 23/VI 2014 г.*

---