

УДК 534.222.2,544.454.3

МАСШТАБНЫЙ ФАКТОР ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕЙ СИНТЕЗ-ГАЗ — ВОЗДУХ

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

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

В проточной кольцевой цилиндрической камере диаметром 503 мм реализованы многоволновые режимы непрерывной спиновой детонации смесей синтез-газ — воздух. В экспериментах использовались смеси оксида углерода и водорода с соотношением компонентов 1/3, 1/2 и 1/1. Варьировались расходы воздуха, синтез-газа и их соотношение, а также длина камеры. Показана масштабируемость процесса непрерывной спиновой детонации: при одинаковых значениях удельного расхода воздуха и коэффициента расширения канала камеры сгорания число поперечных детонационных волн возрастает с увеличением диаметра камеры. В исследованных диапазонах длин камер и удельных расходов воздуха частота этих волн не зависит от длины камеры, за исключением узких областей смены режимов по числу волн. Структуры поперечных детонационных волн при регулярных режимах практически идентичны для всех исследованных составов синтез-газа. Показано, что инициирование детонации возможно струей продуктов сгорания. Получены оценки минимального диаметра детонационной камеры с увеличением расхода смеси.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, синтез-газ, воздух, поперечные детонационные волны, камера сгорания, система подачи топлива, фоторегистрация, структура течения.

DOI 10.15372/FGV20170209

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведется интенсивное экспериментальное и теоретическое изучение непрерывного детонационного сжигания топлива по схеме Б. В. Войцеховского [1]. Подробности исследований можно найти в книге [2]. Первые успешные эксперименты по реализации непрерывной спиновой детонации (НСД) топливоздушных смесей (ТВС) в проточной кольцевой цилиндрической камере сгорания диаметром $d_c = 306$ мм (ДК-300) были проведены для смесей C_2H_2 — воздух [3], H_2 — воздух [4], синтез-газ — воздух [5]. Обобщенный анализ современного состояния исследований НСД в ТВС представлен в обзоре [6]. Влияние трех геометрических параметров кольцевой цилиндрической камеры (длины, ширины кольцевой щели подачи воздуха, зазора между стенками) и дополнительной подачи воздуха на

реализацию НСД смесей синтез-газ — воздух трех составов исследовано в [7].

Цель настоящей работы — реализовать режимы НСД при увеличении диаметра проточной кольцевой цилиндрической камеры сгорания до 503 мм (в 1.64 раза) и определить влияние масштабного фактора — диаметра камеры и ее длины — на реализацию НСД в смесях синтез-газ — воздух.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Наружный диаметр кольцевой цилиндрической камеры сгорания 1 (ДК-500) составлял $d_c = 503$ мм, длина $L_c = 153, 293$ или 540 мм, зазор между стенками $\Delta = 18$ мм (площадь поперечного сечения канала $S_\Delta = \pi(d_c - \Delta)\Delta = 274.14$ см²). Воздух в камеру сгорания поступал из двух ресиверов 4 объемом 43.3 и 41.3 л по кольцевому коллектору 3 через кольцевую щель 2 шириной $\delta = 3.5$ мм (площадь проходного сечения $S_\delta = \pi(d_c - \delta)\delta = 54.9$ см²). Коэффициент расширения канала камеры сгорания $K_S = S_\Delta/S_\delta = 5.0$. Горючее поступало из ресивера 7 объемом 24 л по кольцевому

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-01-00178а (§ 2.1)), фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ-2695.2014.1 (§ 2.2)), Программы фундаментальных научных исследований III.22.2.1 (§ 2.3).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Самсонов А. Н., 2017.

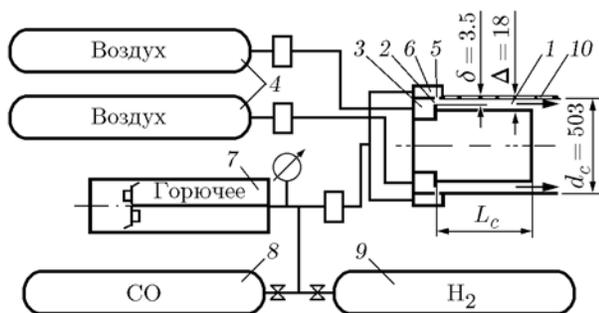


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — камера сгорания, 2 — кольцевая щель, 3, 6 — кольцевой коллектор, 4 — ресивер воздуха, 5 — форсунка, 7 — ресивер горючего, 8 — баллон с оксидом углерода, 9 — баллон с водородом, 10 — окна из оргстекла

коллектору 6 через форсунку 5. В форсунке имелось 600 отверстий с поперечным сечением 0.35×1.45 мм, направленных попарно под углом 90° и под углом 45° к оси камеры. Оксид углерода из баллона 8 и водород из баллона 9 поступали в ресивер и в нем перемешивались аналогично тому, как описано в работе [5].

Использовали горючие газы с содержанием примесей не более 0.5 % (по объему). Для более равномерного распределения газовой смеси по окружности камеры воздух и горючее подавались в соответствующие коллекторы 3 и 6 через два входных отверстия, расположенных диаметрально противоположно. Сдвиг между отверстиями ввода воздуха и горючего составлял 90° (на рис. 1 они условно изображены в одной плоскости).

Начальное давление горючего в ресивере устанавливалось одинаковым во всех опытах — $p_{r,f0} \approx 60 \cdot 10^5$ Па. В результате начальные расходы синтез-газа составов $\text{CO} + m\text{H}_2$, $m = 1, 2$ и 3 , равнялись $G_{f0} \approx 1.3, 1.2$ и 1.1 кг/с соответственно. Выбор начального давления в ресивере воздуха из диапазона $p_{r,a0} = (30 \div 48) \cdot 10^5$ Па обеспечивал начальные расходы воздуха $G_{a0} \approx 6, 7.8$ и 9 кг/с соответственно, что позволило получить ТВС с коэффициентом избытка горючего ϕ , близким к стехиометрии: $\phi = (G_f/G_a)\chi_0 \approx 1$. Здесь $\chi_0 = G_a/G_{f,st}$ — стехиометрический коэффициент, $G_{f,st}$ — расход горючего, соответствующий стехиометрическому соотношению с воздухом. Коэффициент χ_0 зависит от состава синтез-газа $\text{CO} + m\text{H}_2$: $\chi_0 = 4.58$ при $m = 1$, $\chi_0 = 6.44$ при $m = 2$, $\chi_0 = 8.08$ при $m = 3$.

В течение опыта, который длился около 0.9 с, расход синтез-газа уменьшался примерно в 6, 8.5 и 10.5 раза соответственно в составах с $m = 1, 2$ и 3 , а воздуха — в 6.5 раза. При удельных расходах воздуха через кольцевую щель $g_\delta = G_a/S_\delta = 139 \div 1694$ кг/(с·м²) и ТВС через поперечное сечение камеры сгорания $g_\Sigma = (G_a + G_f)/S_\Delta = g_\delta(1 + \phi/\chi_0)/K_S = 26.5 \div 379$ кг/(с·м²) коэффициент избытка горючего изменялся в диапазоне $\phi = 0.64 \div 1.52$. Процесс инициировался пережиганием электротокотом полоски алюминиевой фольги в струе ацетиленокислородной смеси, факел которой поджигал ТВС после подачи синтез-газа в ДК-500. Истечение продуктов сгорания происходило в окружающую среду с давлением $p_a = 10^5$ Па. Фото съемка НСД велась высокоскоростной камерой Photron Fastcam SA1.1 675K-M3 через продольные окна из оргстекла 10 (см. рис. 1), расположенные друг за другом вдоль стенки камеры. Методы конструирования фоторегистрограмм по фотоснимкам, определения частоты вращения f поперечной детонационной волны (ПДВ), числа ПДВ n и скорости непрерывной спиновой детонации D аналогичны [7]. Ширина каждого окна 20 мм, длина 93 мм. Расстояние между окнами 24 мм, а от края первого окна до торца камеры — 29 мм. В ряде опытов проводилась развертка движения ПДВ и течения в ее окрестности поперек окна (x, t -диаграмма). Размеры окон служили масштабом происходящих явлений. Давление в ресиверах воздуха ($p_{r,a1}, p_{r,a2}$), синтез-газа ($p_{r,f}$) и в соответствующих коллекторах ($p_{m,a}, p_{m,f}$), а также статическое (p_{c1}, p_{c2}, p_{c3}) и полное (p_{c30}) давление в камере сгорания регистрировались на расстоянии 3 и 10 см от переднего торца камеры (p_{c1}, p_{c2}) и вблизи ее выхода (p_{c3}, p_{c30}) (см. рис. 1). Давление измерялось датчиками S-10 фирмы WIKA с классом точности 0.5 %.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В цилиндрической камере ДК-500 при фиксированном коэффициенте расширения канала камеры $K_S = 5.0$ в области указанных выше параметров подачи компонентов ТВС (G_a, G_f) были осуществлены многоволновые ($n = 2 \div 4$) режимы НСД смесей синтез-газ — воздух. Использовался синтез-газ трех составов: $\text{CO} + \text{H}_2$, $\text{CO} + 2\text{H}_2$, $\text{CO} + 3\text{H}_2$. Результаты экспериментов изложены ниже для смесей в по-

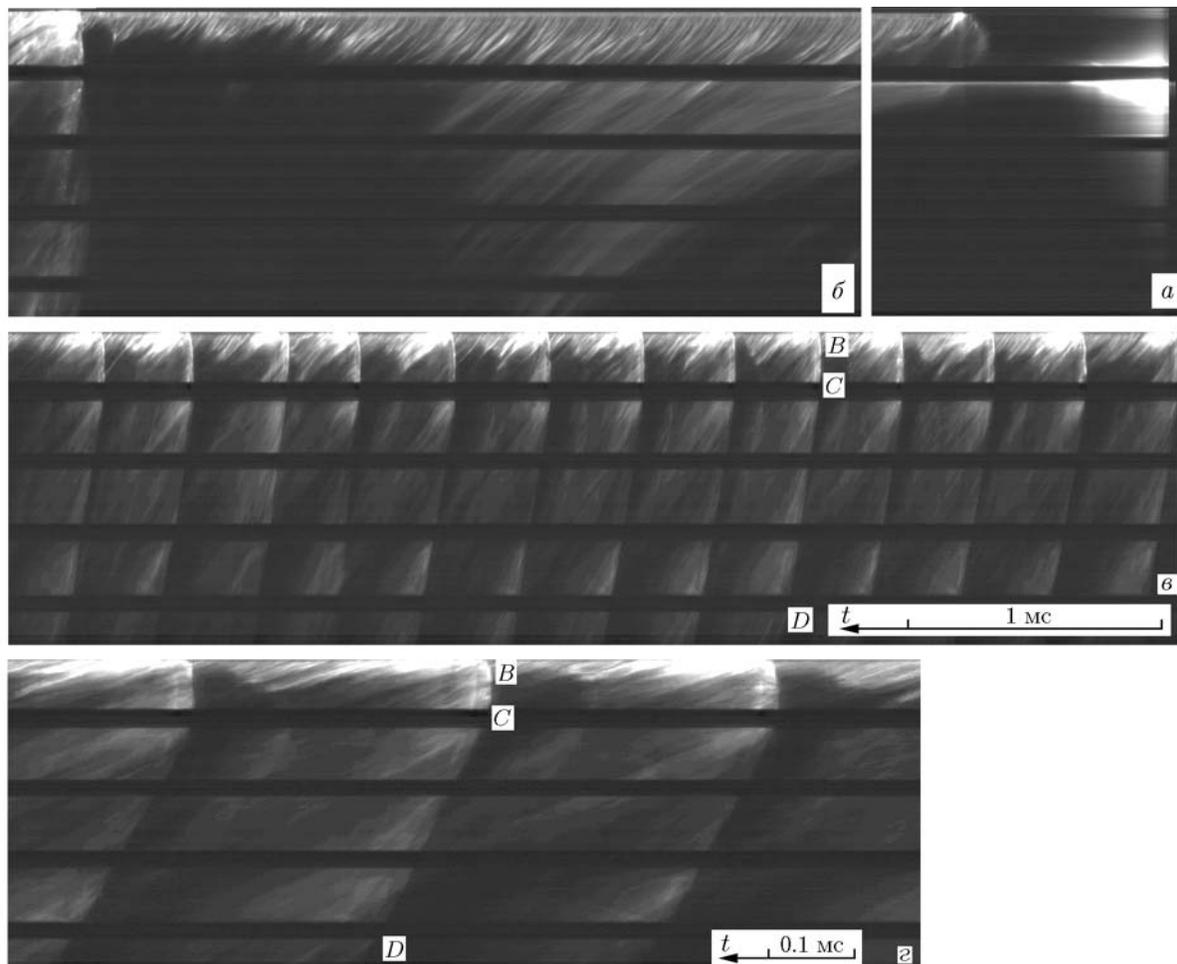


Рис. 2. Фрагменты фоторегистрограмм ПДВ в смеси $\text{CO} + 3\text{H}_2 + \text{воздух}$ (ДК-500, $L_c = 540$ мм):
 а — инициирование струи смеси $\text{C}_2\text{H}_2\text{—O}_2$; б — поступление в камеру синтез-газа и формирование ПДВ;
 в — регулярные ПДВ ($g_\delta = 960$ кг/(с·м²), $\phi = 1.51$, $f = 2.86$ кГц, $n = 3$, $D = 1.45$ км/с); г — фрагмент
 с приведенными к одному масштабу изображениями трех ПДВ, расположенных по окружности камеры

рядке уменьшения молярной доли водорода в составе синтез-газа.

2.1. Синтез-газ состава $\text{CO} + 3\text{H}_2$

На рис. 2 приведены характерные фрагменты фоторегистрограмм процесса инициирования, зарождения и распространения НСД, полученные в ДК-500 ($K_S = 5.0$, $L_c = 540$ мм) для ТВС с синтез-газом состава $\text{CO} + 3\text{H}_2$. После подрыва алюминиевой фольги (рис. 2, а, яркая вспышка) загоралась струя смеси $\text{C}_2\text{H}_2\text{—O}_2$. Через 22.6 мс в камеру начинал поступать синтез-газ, который загорался в потоке воздуха от продуктов сгорания струи (рис. 2, б, начало). Примерно еще через 1 мс в камере развивалась тангенциальная неустойчивость, которая при $g_\delta = 1055$ кг/(с·м²) и $\phi = 1.58$ сформировала

первую ПДВ (см. конец развертки на рис. 2, б). Далее в камере сгорания в течение 6.5 мс распространялась многоволновая НСД с нерегулярной структурой, которая затем стабилизировалась. По фоторегистрограммам НСД измерялась частота вращения ПДВ f , что позволяло по методике [2, 7] оценить число ПДВ n , размещающихся на периметре камеры сгорания, и их скорость D .

В диапазоне $g_\delta = 1032 \rightarrow 863$ кг/(с·м²) при $\phi = 1.58 \rightarrow 1.42$ наблюдали три ПДВ с частотой вращения $f = 2.86 \rightarrow 2.84$ кГц, движущиеся со скоростью $D = 1.45 \rightarrow 1.44$ км/с. Фрагмент фоторегистрограммы НСД с регулярной трехволновой структурой в системе волны приведен на рис. 2, в. Длительность фрагмента процесса вдоль дорожки состави-

ла 4.6 мс. Поперечные фронты BC детонационных волн и присоединенные к ним шлейфы CD (косые ударные волны в продуктах реакции) двигались слева направо, сжигая поступающую из системы подачи смесь, подсвеченную продуктами сгорания ацетиленокислородной струи. Переходный процесс при сокращении числа ПДВ ($n = 3 \rightarrow 2$) продолжался 41 мс. Две ПДВ существовали до конца эксперимента в диапазоне $g_\delta = 785 \rightarrow 152 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при $\phi = 1.36 \rightarrow 0.92$ с монотонным изменением частоты $f = 1.89 \rightarrow 1.5 \text{ кГц}$ и скорости НСД $D = 1.46 \rightarrow 1.14 \text{ км}/\text{с}$. При удельном расходе воздуха $g_\delta \leq 390 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, аналогично опытам с ДК-300 [7], наблюдали скачки уплотнения, проникающие в камеру сгорания из внешней среды.

Следует отметить, что структура ПДВ, полученная при обработке фотографий, снятых высокоскоростной видеокамерой, искажена. Вдоль окружности камеры масштаб зависит от числа ПДВ, их скорости, а также скорости фотосъемки. Зная число ПДВ по окружности кольцевого канала камеры, можно сопоставить его длину с зафиксированной длиной изображения. Изображение становится более размытым, однако структура ПДВ и картина течения в их окрестности приближаются к реальности. Искажения в структуру волны вносят также несоответствия направления и скорости движения изображения ПДВ относительно видеоматрицы фотокамеры со скоростью и направлением считывания с нее изображения. На рис. 2,г приведен пример коррекции фрагмента изображения трех ПДВ, отмеченных на рис. 2,в. Три волны расположены по длине окружности камеры. Для процесса в данный момент времени фрагмент растянут по оси времени в 3.43 раза. В другие моменты времени с другим количеством волн и другими их скоростями коэффициенты растяжения будут отличаться.

Для рассматриваемого режима НСД на рис. 3,а приведены осциллограммы давления в ресиверах воздуха ($p_{r,a1}$, $p_{r,a2}$) и горючего ($p_{r,f}$), а на рис. 3,б — осциллограммы давления в коллекторе воздуха ($p_{m,a}$) и в камере (p_c). Резкий подъем давления в камере соответствует моменту инициирования детонации. Проявляется влияние процесса в камере на давление в коллекторе воздуха: после инициирования оно возрастает примерно на $1.3 \cdot 10^5 \text{ Па}$, несмотря на то, что перепад давления в щели подачи воз-

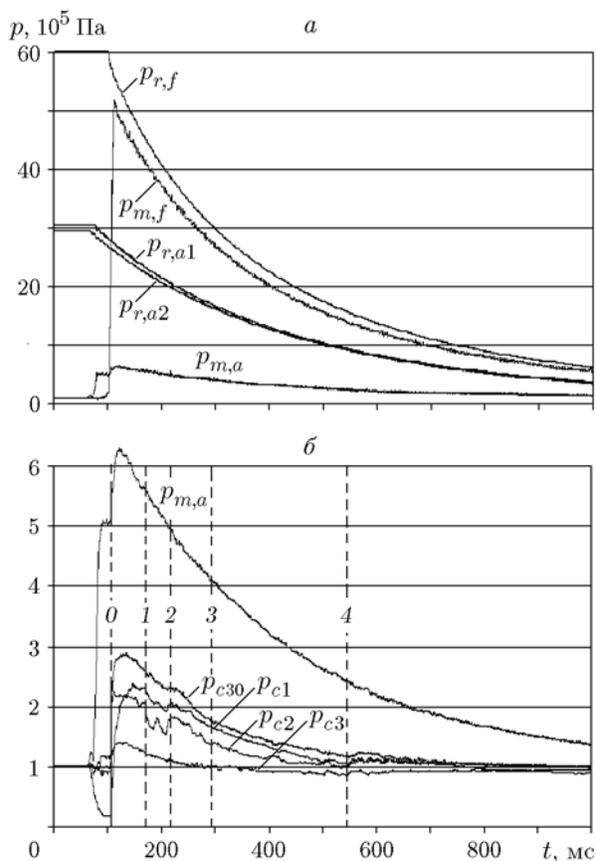


Рис. 3. Осциллограммы давления в системе подачи (а) и в коллекторе воздуха и камере ДК-500 (б):

основные параметры режима НСД приведены на рис. 4 и в табл. 1; 0–4 — границы между областями с различным течением

духа сверхкритический.

На рис. 3,б вертикальными штриховыми линиями 0–4 разграничены области, в которых течение в камере ДК-500 существенно различается, а именно: 0 — конец истечения холодных компонентов и начало развития НСД, 1–2 — начало и конец конкуренции числа ПДВ ($n = 3 \leftrightarrow 2$), 3 — смена сверхкритического ($p_{cr} > p_{c3}$) на докритическое ($p_{cr} < p_{c3}$) истечение продуктов детонации из камеры, 4 — начало проникновения скачков уплотнения в камеру сгорания. Критическое давление p_{cr} вычислялось по известной формуле $p_{cr} = (2/(\gamma + 1))^{\gamma/(\gamma-1)} p_{c30}$. Граница 3 соответствует $p_{cr} = p_{c3}$, где p_{cr} определялось при $\gamma = 1.25$ для продуктов детонации на выходе из камеры. Заметим, что в ДК-500 $p_{c3} = p_{cr}$ при значениях удельного расхода воздуха через щель $g_\delta \approx 668 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и

смеси синтез-газ — воздух $g_{\Sigma} \approx 154 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

Из рис. 3,б видно, что перед инициированием детонации в начале камеры сгорания развивается струйное течение — $p_{c1} \approx 0.2 \cdot 10^5 \text{ Па} \ll 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$. В период нерегулярности ПДВ (переход $n = 3 \leftrightarrow 2$ в интервале времени $174 < t < 214 \text{ мс}$ на осциллограмме) заметно снижаются статические давления в камере p_{c1} и p_{c2} (примерно на 6 и 15 %). Давления на выходе из камеры p_{c3} и p_{c30} уменьшаются незначительно (в пределах 1 %). Смена сверхкритического истечения на докритическое отмечена равенством $p_{c3} \approx p_a$, но никак не проявляется на профилях других осциллограмм. С этого момента времени в камеру начинают проникать слабые звуковые возмущения извне и влиять на структуру течения. Следует отметить, что в ДК-300 этот переход осуществлялся при тех же значениях удельного расхода воздуха через щель. В дальнейшем проникновение скачков уплотнения в камеру вызывает небольшое повышение давления по всей длине камеры.

Зависимость частоты вращающихся ПДВ от удельного расхода воздуха через кольцевую щель в камере ДК-500 ($L_c = 540 \text{ мм}$) представлена на рис. 4 (точки 1). Левее первой вертикальной штриховой линии режим НСД находится под влиянием скачков уплотнения, входящих в камеру извне. Вторая линия разграничивает области сверхкритического и до-

критического истечения продуктов из камеры сгорания. Для сравнения на рисунке нанесены (точки 4) значения частоты вращения волн в ДК-300 ($K_S = 5.25$, $L_c = 525 \text{ мм}$) [7]. Анализ сравнения частот ПДВ в камерах ДК-500 и ДК-300 подробно проводится в следующем параграфе.

В камере ДК-500 длиной $L_c = 293 \text{ мм}$ в диапазоне удельных расходов воздуха $g_{\delta} = 1572 \rightarrow 1453 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при $\phi = 1.02 \rightarrow 1.04$ в течение 11 мс происходила конкуренция между пятью и четырьмя волнами НСД. После этого в диапазоне $g_{\delta} = 1453 \rightarrow 1237 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при $\phi = 1.04 \rightarrow 1.03$ развилась регулярная четырехволновая НСД с частотой вращения $f = 3.57 \rightarrow 3.31 \text{ кГц}$ (см. рис. 4, точки 2) и скоростью $D = 1.36 \rightarrow 1.26 \text{ км}/\text{с}$. Переходный процесс при сокращении числа ПДВ до трех ($n = 4 \rightarrow 3$) был быстрым — около 4 мс, трехволновая НСД наблюдалась в диапазоне $g_{\delta} = 1237 \rightarrow 761 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при $\phi = 1.03 \rightarrow 0.9$ с частотой $f = 3.01 \rightarrow 2.56 \text{ кГц}$ и скоростью $D = 1.53 \rightarrow 1.3 \text{ км}/\text{с}$. Затем на двух оборотах волны сформировались две ПДВ, которые существовали до конца эксперимента при $g_{\delta} = 761 \rightarrow 138 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 0.9 \rightarrow 0.82$ с монотонным уменьшением $f = 1.94 \rightarrow 1.39 \text{ кГц}$ и $D = 1.43 \rightarrow 1.06 \text{ км}/\text{с}$. При переходах $n = 4 \rightarrow 3$ и $n = 3 \rightarrow 2$ статическое давление в начале камеры немного понижалось (примерно на 5 %), а полное давление оставалось неизменным.

С уменьшением длины ДК-500 до $L_c = 153 \text{ мм}$ переходный процесс после инициирования с нерегулярными ПДВ длился около 9 мс, затем в диапазонах $g_{\delta} = 1235 \rightarrow 1161 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и $\phi = 1.18 \rightarrow 1.15$ установилась регулярная четырехволновая НСД с частотой вращения $f = 3.81 \text{ кГц}$ (см. рис. 4, кривая 3) и скоростью $D = 1.45 \text{ км}/\text{с}$. Структура волн не отличалась от приведенных на рис. 2,в. Переходный процесс при сокращении числа ПДВ ($n = 4 \rightarrow 3$) был быстрым — около 4 мс, трехволновая НСД наблюдалась в диапазонах $g_{\delta} = 1161 \rightarrow 661 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и $\phi = 1.15 \rightarrow 1.02$ с частотой $f = 2.93 \rightarrow 2.7 \text{ кГц}$ и скоростью $D = 1.49 \rightarrow 1.37 \text{ км}/\text{с}$. Затем на одном обороте волны сформировались две ПДВ, которые существовали до конца эксперимента при $g_{\delta} = 661 \rightarrow 108 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 1.02 \rightarrow 1$ с монотонным уменьшением $f = 1.98 \rightarrow 1.14 \text{ кГц}$ и $D = 1.51 \rightarrow 0.87 \text{ км}/\text{с}$. Заметим, что длина камеры ДК-500 $L_c = 153 \text{ мм}$ становится недостаточной при $n = 2$, так как фронт ПДВ уже выходит за

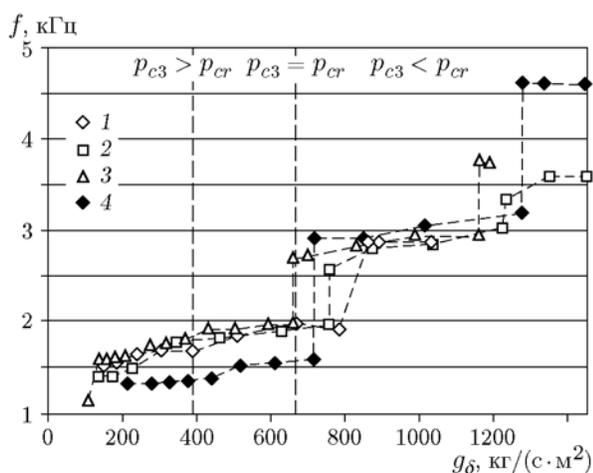


Рис. 4. Частота ПДВ в зависимости от удельного расхода воздуха через кольцевую щель в камере ДК-500 для горючего $\text{CO} + 3\text{H}_2$:

1 — $L_c = 540 \text{ мм}$, 2 — 293 мм , 3 — 153 мм ; 4 — камера ДК-300 ($K_S = 5.25$, $L_c = 525 \text{ мм}$) [7]

Таблица 1

Параметры НСД смеси CO + 3H₂ + воздух в камерах сгорания различной длины

L_c , мм	g_δ , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	D , км/с	h , см
540	1032 → 863	1.58 → 1.42	2.86	3	1.45	13
	863 → 785	1.42 → 1.36	2.43 ↔ 1.96	3 ↔ 2	1.23 ↔ 1.49	13 ↔ 20
	785 → 152	1.36 → 0.92	1.89 → 1.5	2	1.46 → 1.14	20
293	1572 → 1453	1.02 → 1.04	4.92 ↔ 3.7	5 ↔ 4	1.5 ↔ 1.41	8 ↔ 10
	1453 → 1237	1.04 → 1.03	3.57 → 3.31	4	1.36 → 1.26	10
	1237 → 761	1.03 → 0.9	3.01 → 2.56	3	1.53 → 1.3	13
	761 → 138	0.9 → 0.82	1.94 → 1.39	2	1.43 → 1.06	20
153	1235 → 1161	1.18 → 1.15	3.81	4	1.45	10
	1161 → 661	1.15 → 1.02	2.93 → 2.7	3	1.49 → 1.37	13
	661 → 108	1.02 → 1	1.98 → 1.14	2	1.51 → 0.87	20

Примечание. Символ ↔ означает переход от одного количества волн к другому и обратно.

пределы этой камеры ($L_c < h \approx 200$ мм), однако это обстоятельство не отразилось на развитии регулярной НСД. Для более наглядного восприятия указанных выше переходов режимов НСД в табл. 1 представлены параметры НСД в камерах ДК-500 различной длины.

Заметим, что в области конкуренции чисел ПДВ $n = 5 \leftrightarrow 4$ и $n = 3 \leftrightarrow 2$ затруднительно определить точно их среднюю частоту вращения. Например, при $n = 3 \leftrightarrow 2$ частота и скорость ПДВ в случае $n = 3$ были меньше, а при $n = 2$ — больше, чем в режимах с регулярными ПДВ при том же количестве волн (см. табл. 1). При конкуренции $n = 5 \leftrightarrow 4$ эта закономерность соблюдалась для $n = 4$, а при $n = 5$ ее не удалось определить из-за недостаточного объема информации, так как опыты с большими удельными расходами воздуха не проводились.

В описанных выше экспериментах в камерах ДК-500 длиной $L_c = 540, 293$ и 153 мм структура волн не отличалась от приведенных на рис. 2, в, а высота ПДВ равнялась $h \approx 8, 10, 13$ и 20 см при $n = 5, 4, 3$ и 2 соответственно. Отношение размера ПДВ к расстоянию между волнами составляло $h/l \approx 1/4$. Из рис. 4 и табл. 1 видно, что зависимости частоты вращения волн от удельного расхода воздуха в камерах длиной $L_c = 153 \div 540$ мм оказались близки. Лишь переходы $n = 4 \rightarrow 3$ и $n = 3 \rightarrow 2$ в камере длиной $L_c = 153$ мм наблюдались при меньших значениях g_δ , чем в случаях $L_c = 540$

и 293 мм. Таким образом, можно утверждать, что в исследованных диапазонах длин камеры сгорания и удельных расходов воздуха соответствующие частоты ПДВ не зависят от длины камеры, за исключением узких областей смены режимов по числу ПДВ.

2.2. Синтез-газ состава CO + 2H₂

Исследование НСД горючего CO + 2H₂ с воздухом интересно тем, что данный состав синтез-газа получается при неполном термическом окислении метана ($\text{CH}_4 + 0.5\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2$). На рис. 5 приведен характерный фрагмент фоторегистрограммы распространения НСД в ДК-500 длиной $L_c = 540$ мм для смеси CO + 2H₂ + воздух в момент перехода $n = 3 \rightarrow 2$. Видно, что структура ПДВ идентична приведенной на рис. 2, в для смеси CO + 3H₂ + воздух. В данном опыте через 5 мс после поступления в камеру синтез-газа развилась регулярная НСД, данные по которой приведены в табл. 2. Следует отметить, что в области докритического истечения продуктов детонации после прихода в камеру скачков уплотнения извне при $g_\delta < 370$ кг/(с·м²) регулярность НСД была нарушена.

За время процесса давление в коллекторе воздуха изменялось в пределах $p_{m,a} = (6.3 \rightarrow 1.3) \cdot 10^5$ Па, а в камере — $p_{c1} = (2.3 \rightarrow 1.0) \cdot 10^5$ Па, $p_{c2} = (2.2 \rightarrow 1.0) \cdot 10^5$ Па, $p_{c3} = (1.44 \rightarrow 1.0) \cdot 10^5$ Па, $p_{c30} = (2.9 \rightarrow 1.02) \cdot 10^5$ Па.

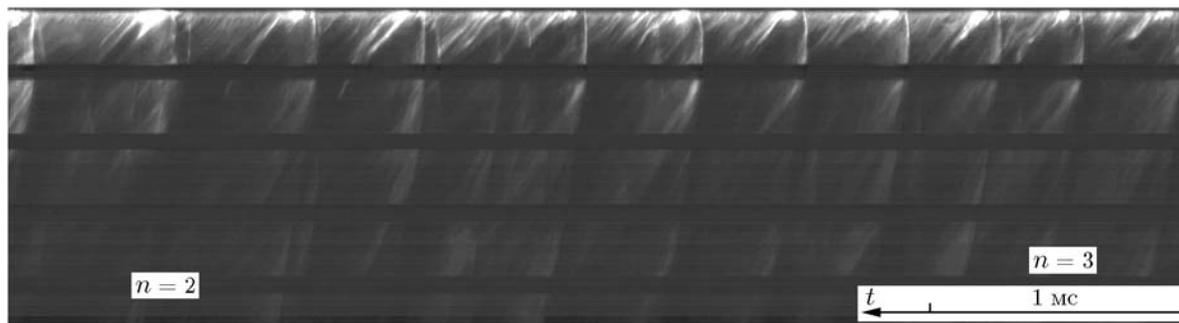


Рис. 5. Фоторегистрограмма ПДВ в смеси CO + 2H₂ + воздух:

$g_{\delta} = 756 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 1.25$ (переход $n = 3 \rightarrow 2$); $n = 3$: $f = 2.58 \text{ кГц}$, $D = 1.31 \text{ км}/\text{с}$; $n = 2$: $f = 1.86 \text{ кГц}$, $D = 1.42 \text{ км}/\text{с}$

Таблица 2

Параметры НСД смеси CO + 2H₂ + воздух в камерах сгорания различной длины

L_c , мм	g_{δ} , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	D , км/с	h , см
540	973 → 756	1.29 → 1.25	2.73 → 2.58	3	1.39 → 1.31	13
	756 → 147	1.25 → 1.04	1.86 → 1.51	2	1.42 → 1.13	20
293	1 137 → 1 096	1.14	3.57	4	1.36	10
	1 096 → 676	1.14 → 0.93	2.83 → 2.54	3	1.44 → 1.29	13
	676 → 174	0.93 → 0.83	1.88 → 1.39	2	1.43 → 1.06	20
153	1 113 → 998	1.24 → 1.19	3.6	4	1.37	10
	998 → 686	1.19 → 1.02	2.82 → 2.56	3	1.43 → 1.3	13
	686 → 164	1.02 → 0.81	1.87 → 1.53	2	1.43 → 1.17	20

При переходе $n = 3 \rightarrow 2$ статическое давление в камере возросло, однако полное давление не изменилось. Зависимость частоты вращения ПДВ от удельного расхода воздуха через кольцевую щель для данного опыта представлена на рис. 6 (кривая 1, см. также табл. 2). Вертикальная штриховая линия $g_{\delta} = 670 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ разграничивает области сверхкритического и докритического режимов истечения продуктов детонации. Видно, что двухволновые режимы НСД почти целиком находятся в области удельных расходов, соответствующих докритическому режиму истечения ($p_{c30}/p_{c3} < 1.8$). Для сравнения на рис. 6 нанесены (точки 4) значения частоты ПДВ в ДК-300 ($K_S = 5.25$, $L_c = 525 \text{ мм}$) [7].

В ДК-500 длиной $L_c = 293 \text{ мм}$ переходный процесс с момента инициирования до начала формирования первой ПДВ длился около 3 мс, затем шла конкуренция между пятью и четырьмя волнами, а через 10 мс (при $g_{\delta} = 1137 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и $\phi = 1.14$) развивалась регу-

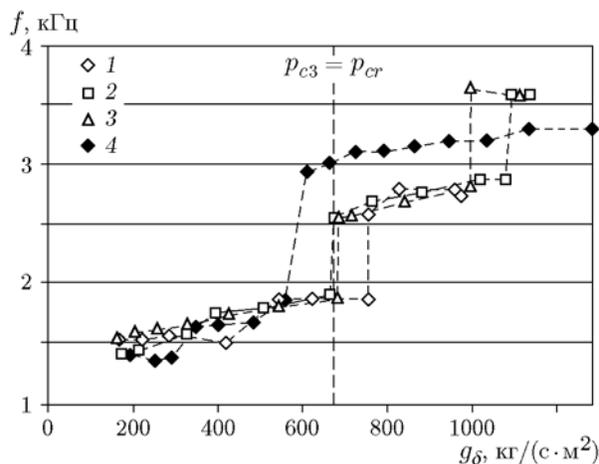


Рис. 6. Частота ПДВ в зависимости от удельного расхода воздуха через кольцевую щель в камере ДК-500 для горючего состава CO + 2H₂:

1 — $L_c = 540 \text{ мм}$, 2 — 293 мм , 3 — 153 мм ; 4 — камера ДК-300 ($K_S = 5.25$, $L_c = 525 \text{ мм}$) [7]

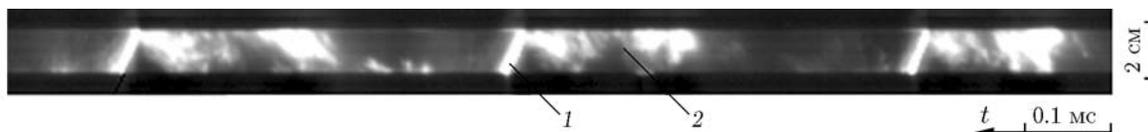


Рис. 7. x, t -Диаграммы ПДВ в смеси $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{воздух}$ (ДК-500, $L_c = 540$ мм):

$g_\delta = 903 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 0.88$, $g_\Sigma = 215 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $n = 3$, $D = 1.38 \text{ км}/\text{с}$ ($f = 2.71 \text{ кГц}$); 1 — развертка движения ПДВ, 2 — продуктов

лярная НСД с четырьмя волнами и последовательным их уменьшением до двух (см. точки 2 на рис. 6 и табл. 2).

При уменьшении длины ДК-500 до $L_c = 153$ мм переходный процесс после инициирования продолжался около 8 мс, затем развивалась регулярная четырехволновая НСД с последовательным уменьшением волн до двух (см. точки 3 на рис. 6 и табл. 2). Структура волн не отличалась от представленной на рис. 5, осциллограммы давления в системе подачи и в камере близки к приведенным для смеси $\text{CO} + 3\text{H}_2 + \text{воздух}$ (см. рис. 3).

Данные рис. 6 показывают, что в ДК-500 длиной $L_c = 540, 293$ и 153 мм зависимости частоты вращения волн от удельного расхода воздуха g_δ близки. Лишь переходы $n = 3 \rightarrow 2$ в камере $L_c = 293$ мм (точки 2) и $n = 4 \rightarrow 3$ в камере $L_c = 153$ мм (точки 3) наблюдались при меньших значениях g_δ . Таким образом, можно утверждать, что для смеси $\text{CO} + 2\text{H}_2 + \text{воздух}$ в исследованных диапазонах длин камеры ДК-500 и удельных расходов воздуха соответствующие частоты вращения ПДВ не зависят от длины камеры, за исключением узких областей смены режимов по числу ПДВ.

В течение всего времени наблюдения НСД в различных по длине камерах ДК-500 динамика спада давления в коллекторе воздуха и камере была примерно одинаковой, а размер фронта ПДВ не зависел от длины камеры и равнялся $h \approx 10, 13$ и 20 см при $n = 4, 3$ и 2 соответственно. Отношение размера ПДВ к расстоянию между волнами составляло $l/h \approx 1/4$.

Данные о полном давлении p_{c30} на выходе из ДК-500 показывают, что при $g_\delta < 650 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ($g_\Sigma < 150 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$) реализуется докритическое истечение продуктов детонации ($p_{c30}/p_{c3} < 1.8$). То есть двухволновые режимы в ДК-500 наблюдались в основном в докритической области. Однако переход $n = 3 \rightarrow 2$ происходил в сверхкритической области, в которой НСД с $n = 2$ была непродолжительной.

2.3. Синтез-газ состава $\text{CO} + \text{H}_2$

Исследование непрерывной детонации ТВС с горючим $\text{CO} + \text{H}_2$ имеет не только научное, но и практическое значение, так как синтез-газ близкого к $\text{CO} + \text{H}_2$ состава получается при неполном термическом окислении керосина [5]. Режимы НСД в смеси $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{воздух}$ были осуществлены в камерах ДК-500 длиной $L_c = 153 \div 540$ мм.

Эксперименты в ДК-500 при $L_c = 540$ мм показали, что после инициирования в течение 12 мс развивалась нерегулярная многоволновая НСД. Затем при $g_\delta = 1122 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и $\phi = 0.85$ сформировались регулярные трехволновые режимы НСД с дальнейшим изменением числа ПДВ $n = 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ при уменьшении удельного расхода воздуха $g_\delta = 1122 \rightarrow 208 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и росте $\phi = 0.85 \rightarrow 1.01$.

Для точного определения скорости и числа ПДВ проводились контрольные опыты, в которых применялся метод развертки светящихся объектов, движущихся через поперечную щель, установленную перпендикулярно окну в области распространения ПДВ [2]. На рис. 7 приведен фрагмент характерной (x, t) -диаграммы движения ПДВ и течения за ними поперек окна на середине его длины. ПДВ на развертке 1 движутся сверху вниз. Продукты от предыдущей ПДВ в волне разрежения движутся в обратном направлении — снизу вверх (развертка 2). По наклону развертки 1 находится приближенная скорость ПДВ — $D' = \Delta x / \Delta t$, где $\Delta x = 20$ мм — ширина окна, $\Delta t = N \cdot 2.5$ мкс — время прохождения фронта волны поперек окна, определяемое по количеству пикселей N , длительность которых задана временем экспозиции — 2.5 мкс. По этой приближенной скорости ПДВ точно определяется средняя скорость ПДВ за период одного оборота по окружности камеры, а также количество ПДВ [2].

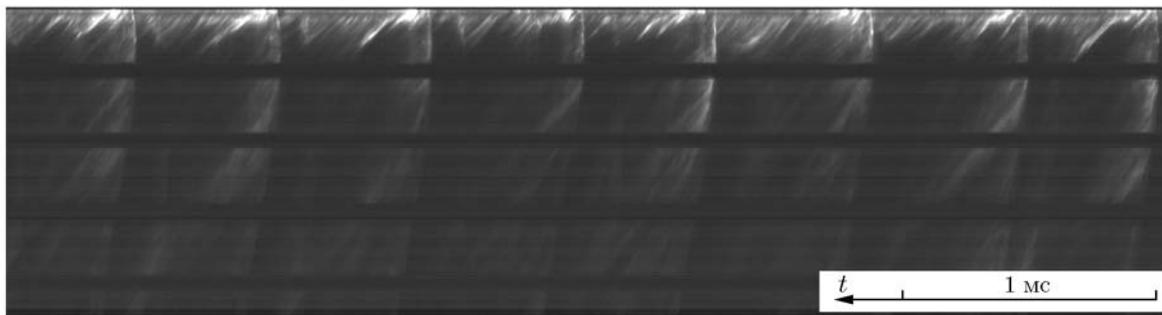


Рис. 8. Фоторегистрограмма ПДВ в смеси CO + H₂ + воздух (ДК-500, L_c = 540 мм):
 g_δ = 605 кг/(с·м²), φ = 0.93, g_Σ = 150 кг/(с·м²), n = 2, D = 1.33 км/с (f = 1.75 кГц)

Таблица 3

Параметры НСД смеси CO + H₂ + воздух в камерах сгорания различной длины

L _c , мм	g _δ , кг/(с·м ²)	φ	f, кГц	n	D, км/с	h, см
540	1 122 → 631	0.85 → 0.92	3.08 → 2.6	3	1.56 → 1.32	13
	631 → 358	0.92 → 0.97	1.83 → 1.59	2	1.4 → 1.21	20
	358 → 208	0.97 → 1.01	0.98 → 0.87	1	1.49 → 1.33	35
293	1 064 → 667	0.87 → 0.92	2.87 → 2.61	3	1.46 → 1.33	14
	667 → 234	0.92 → 1.02	1.87 → 1.69	2	1.42 → 1.28	20
	234 → 206	1.02 → 1.04	0.88 → 0.83	1	1.33 → 1.27	≈35
153	1 072 → 991	0.92	3.02 ↔ 2.86	4 ↔ 3	1.15 ↔ 1.45	10 ↔ 13
	991 → 867	0.92 → 0.93	2.64 → 2.52	3	1.34 → 1.28	13
	867 → 138	0.93 → 0.97	1.84 → 1.46	2	1.4 → 1.11	20

Фрагмент фоторегистрограммы двухволновой НСД с регулярной структурой в ДК-500 (L_c = 540 мм) при g_δ = 605 кг/(с·м²) приведен на рис. 8. Длительность фрагмента процесса вдоль дорожки составляет 4.64 мс. Фронты ПДВ и присоединенные к ним ударно-волновые шлейфы движутся слева направо. Размер ПДВ равен h ≈ 20 см, а его отношение к расстоянию между волнами — h/l ≈ 1/4. Зависимость частоты вращающихся ПДВ от удельного расхода воздуха через кольцевую щель в данном опыте представлена на рис. 9 (точки 1) и в табл. 3. Для сравнения и последующего анализа на рисунке нанесены (точки 4) значения ПДВ в ДК-300 (K_S = 5.25, L_c = 525 мм) [7].

В ДК-500 при L_c = 293 мм реализовано три ПДВ. Переход n = 3 → 2 происходил очень быстро — на одном обороте ПДВ при g_δ = 667 кг/(с·м²) и φ = 0.92 (см. рис. 9, точки 2). Нерегулярный режим перехода n = 2 ↔ 1 до стабилизации одной ПДВ наблюдали

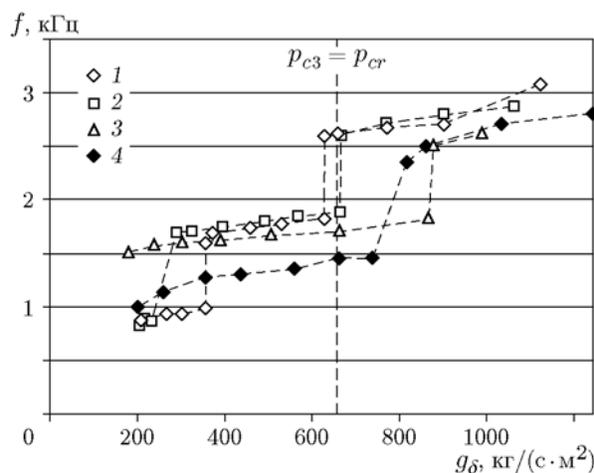


Рис. 9. Частота ПДВ в зависимости от удельного расхода воздуха через кольцевую щель в камере ДК-500 для горючего состава CO + H₂:
 1 — L_c = 540 мм, 2 — 293 мм, 3 — 153 мм; 4 — камера ДК-300 (K_S = 5.25, L_c = 525 мм) [7]

длительное время — 105 мс в диапазоне $g_\delta = 292 \rightarrow 234$ кг/(с·м²), т. е. в докритическом режиме истечения продуктов после прихода скачков уплотнения извне.

При уменьшении длины камеры ДК-500 до $L_c = 153$ мм после зарождения ПДВ процесс нерегулярности НСД длился 37 мс в результате конкуренции между четырьмя и тремя ПДВ ($n = 4 \leftrightarrow 3$), которые сменяли друг друга. Затем установилась регулярная НСД с тремя ПДВ в диапазоне $g_\delta = 991 \rightarrow 867$ кг/(с·м²). Переход $n = 3 \rightarrow 2$ составил несколько миллисекунд, после этого до конца эксперимента установилась регулярная НСД с двумя ПДВ (см. рис. 9, точки 3). Перехода к одноволновому режиму в данном случае не зафиксировано. Динамика процесса НСД отображена в табл. 3. При переходе $n = 3 \rightarrow 2$ возросли статические давления в камере, однако полное давление не изменилось.

В описанных выше опытах в камерах ДК-500 длиной $L_c = 540, 293$ и 153 мм для смеси СО + Н₂ + воздух осциллограммы давления в системе подачи и в камере сгорания близки к приведенным на рис. 3 для состава синтез-газа СО + 3Н₂. Отношение высоты фронта к расстоянию между смежными волнами составляло $h/l \approx 1/4$. Можно также утверждать, что в исследованных диапазонах длин камер и удельных расходов воздуха соответствующие частоты ПДВ не зависят от длины камеры, за исключением узких областей смены режимов по числу ПДВ.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первичная экспериментальная информация о реализации НСД в камерах ДК-500 длиной $L_c = 540, 293$ и 153 мм с фиксированным значением $K_S = 5.0$ в широком диапазоне удельных расходов воздуха g_δ , представленная в предыдущем параграфе, показывает, что при $L_c > h$ (h — высота фронта ПДВ) и сверхкритических режимах истечения продуктов детонации длина камеры не влияет существенно на режимы НСД, частоту, число ПДВ и скорость НСД. Поэтому в соответствии с [7] режимы НСД в ДК-500 зависят от трех определяющих параметров: удельного расхода воздуха через щель основной системы подачи g_δ , коэффициента расширения камеры сгорания K_S и коэффициента избытка горючего ϕ .

3.1. Геометрическое подобие НСД

Для выяснения влияния масштабного эффекта, связанного с диаметром камеры сгорания, на развитие НСД в смесях СО/Н₂ — воздух сравним результаты, полученные в ДК-500, с результатами работы [5], в которой НСД смеси синтез-газ — воздух осуществлялась в камере ДК-300 ($K_S = 5.25, L_c = 525$ мм), при этом размеры отверстий в форсунке горючего и их количества на единицу длины камеры в обоих вариантах были близки. Рассмотрим зависимость частоты ПДВ f от удельного расхода воздуха через кольцевую щель g_δ , представленную на рис. 4 для смеси СО + 3Н₂ + воздух. Видно, что с ростом g_δ частота вращения ПДВ монотонно увеличивается в диапазонах $f = 1.32 \div 4.62$ кГц для ДК-300 (кривая 4) и $f = 1.14 \div 3.8$ кГц для ДК-500 (кривые 1–3). При $g_\delta = 850 \div 1000$ кг/(с·м²), когда в ДК-300 реализуются две, а в ДК-500 — три волны, наблюдается корреляция (с точностью 10 %) частот (подтверждение масштабного эффекта). При $g_\delta < 717$ кг/(с·м²) имеем в ДК-300 режим НСД одноволновый, а в ДК-500 — двухволновый. То есть при отличии числа волн в два раза отношение диаметров камер сгорания $d_{c2}/d_{c1} = 1.64$. Это значит, что в диапазоне $g_\delta < 717$ кг/(с·м²) строгого геометрического подобия просто не может быть. Тем не менее, согласно экспериментам, различие в частоте ПДВ составляет не более 30 %, а скорости НСД — не более 10 %.

Сравнение зависимостей частоты ПДВ в смеси СО + 2Н₂ + воздух от удельного расхода воздуха, представленных на рис. 6, показывает, что в диапазоне $756 < g_\delta < 973$ кг/(с·м²), когда в ДК-300 реализуются две, а в ДК-500 — три волны, наблюдается корреляция (с точностью 15 %) частот (подтверждение масштабного эффекта). При $g_\delta < 560$ кг/(с·м²) имеем в ДК-300 одну волну (кривая 4), а в ДК-500 — две. Как объяснено выше, в этом диапазоне g_δ не может быть строгого геометрического подобия. Кроме того, следует напомнить, что при $g_\delta < 660$ кг/(с·м²) начинается область докритического истечения продуктов детонации из камеры сгорания. Согласно данным рис. 6 двухволновые режимы НСД в ДК-500 и одноволновые в ДК-300 почти целиком находятся в области докритических режимов истечения. Последнее означает, что на динамику и параметры НСД в обеих детонационных камерах

начинает влиять дополнительный параметр — давление окружающей среды. Степень его влияния на режимы НСД в настоящее время неизвестна.

Сравнение зависимостей частот ПДВ в смеси $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{воздух}$ от удельного расхода воздуха, представленных на рис. 9, показывает, что в диапазоне $850 < g_\delta < 1120 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, когда в ДК-300 реализуются две, а в ДК-500 — три волны, наблюдается корреляция (с точностью 12 %) частот (подтверждение масштабного эффекта). При $360 < g_\delta < 630 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ситуация такая же, как и для составов $\text{CO} + 3\text{H}_2$ и $\text{CO} + 2\text{H}_2$: в ДК-500 реализуются две ПДВ, а в ДК-300 — одна. Однако для состава $\text{CO} + 3\text{H}_2$ при удельных расходах $208 < g_\delta < 360 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, соответствующих докритической области истечения продуктов детонации, в обеих камерах наблюдали одну ПДВ. Если в ДК-300 скорости ПДВ были близки к предельной ($D \approx 1.0 \text{ км}/\text{с}$, $f \approx 1.0 \text{ кГц}$), то в ДК-500 ПДВ были достаточно сильными (см. табл. 3). Это означает, что в ДК-500 обеспечивалась бóльшая ширина слоя смеси перед фронтом, что очень важно при существовании ПДВ вблизи пределов. Следует отметить, что в ДК-500 при $g_\delta < 360 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ одноволновый режим реализовывался не во всех опытах, были также и двухволновые режимы, но с более низкими скоростями ($D \approx 1.15 \text{ км}/\text{с}$).

Итак, анализ данных рис. 4, 6 и 9 показал, что при НСД смесей воздуха с исследуемыми составами синтез-газа проявляется масштабный эффект по отношению к диаметру камеры: при одинаковых удельных расходах с увеличением диаметра камеры сгорания возрастает число ПДВ, причем при одинаковом отношении диаметров камер и чисел ПДВ в камерах наблюдается полное геометрическое подобие структур, частот и скоростей ПДВ. Сравнение результатов процесса в ДК-500 и ДК-300 (отношение $d_{c2}/d_{c1} = 1.64 \approx 5/3$) показало, что частоты вращения и скорости ПДВ в исследованном диапазоне удельных расходов смесей CO/H_2 — воздух наиболее близки при отношении чисел волн $n_2/n_1 = 3/2 = 1.5$.

Отметим, что масштабный эффект ранее был подтвержден на примере водородовоздушной смеси при сопоставлении результатов наших работ [2, 4] для камеры диаметром $d_c = 306 \text{ мм}$ с результатами других авторов [8, 9] для камеры $d_c = 150 \text{ мм}$. При одинаковых удельных расходах смеси в камере диаметром

$d_c = 306 \text{ мм}$ было две ПДВ, а в камере $d_c = 150 \text{ мм}$ — одна.

3.2. Относительное полное давление продуктов на выходе

В экспериментах наряду с полным давлением воздуха в коллекторе подачи $p_{m,a}$ измерялось полное давление продуктов детонации на выходе из камеры p_{c30} , которое является важной интегральной характеристикой процесса. На рис. 10 приведены обобщающие зависимости отношения $p_{c30}/p_{m,a}$ от удельного расхода смеси $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{воздух}$ при НСД в камерах ДК-500 длиной $L_c = 540, 293$ и 153 мм . Для сравнения на рисунке представлены данные (точки 4), полученные в ДК-300 ($K_S = 5.25$, $L_c = 525 \text{ мм}$).

На рис. 10 видно, что при критическом истечении продуктов детонации из ДК-500 отношение давлений $p_{c30}/p_{m,a} = 0.49 \pm 0.02$ примерно одинаковое в камерах всех трех длин при $g_\Sigma > 150 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. Это свидетельствует, во-первых, о прямо пропорциональной зависимости величин p_{c30} и $p_{m,a}$, во-вторых, о слабом влиянии длины камеры в диапазоне $L_c = 153 \div 540 \text{ мм}$ на отношение $p_{c30}/p_{m,a}$, в-третьих, о значительных потерях полного давления в щели подачи воздуха при $K_S = 5.0$, в детонационных и ударных скачках, процессах перемешивания и трения на стенках камеры сгорания. При входе скачка уплотнения в ДК-500 ($g_\Sigma < 90 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$) давление

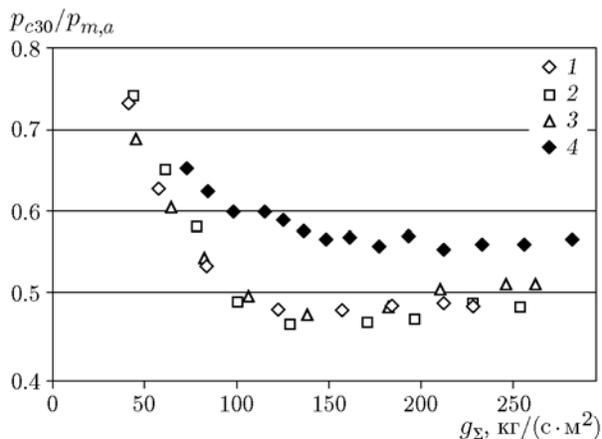


Рис. 10. Зависимость отношения $p_{c30}/p_{m,a}$ от удельного расхода смеси $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{воздух}$ при НСД в камере ДК-500:

1 — $L_c = 540 \text{ мм}$, 2 — 293 мм , 3 — 153 мм ; 4 — камера ДК-300 ($L_c = 525 \text{ мм}$)

торможения уменьшается медленнее, чем давление в коллекторе воздуха, поэтому отношение $p_{c30}/p_{m,a}$ возрастает. Из рис. 10 следует, что данные для камер ДК-300 и ДК-500 коррелируют между собой с точностью не хуже 20 %. При росте удельного расхода ТВС значения $p_{c30}/p_{m,a}$ сближаются. Последнее означает, что отношение $p_{c30}/p_{m,a}$ при НСД с одинаковыми значениями параметров K_S и g_Σ практически не зависит от масштабного эффекта — диаметра камеры ДК. Ясно, что при фиксированных удельных расходах ТВС рост давления торможения p_{c30} и приближение его к $p_{m,a}$ возможно при уменьшении параметра K_S . Подтверждение этого эффекта требует дополнительных экспериментальных исследований.

3.3. Оценка минимального диаметра детонационной камеры

Полученная первичная экспериментальная информация о режимах НСД в ДК-500 ($K_S = 5.0$) для смесей синтез-газ — воздух позволяет оценить минимальный диаметр кольцевой детонационной камеры сгорания $d_{c,min}$, который зависит от удельного расхода ТВС g_Σ . Такая зависимость для смесей с синтез-газом по данным экспериментов в ДК-500 ($K_S = 5.0$) приведена на рис. 11 в сравнении с данными экспериментов в ДК-300 ($K_S = 5.25$) [7]. Горизонтальные линии с одинаковыми знач-

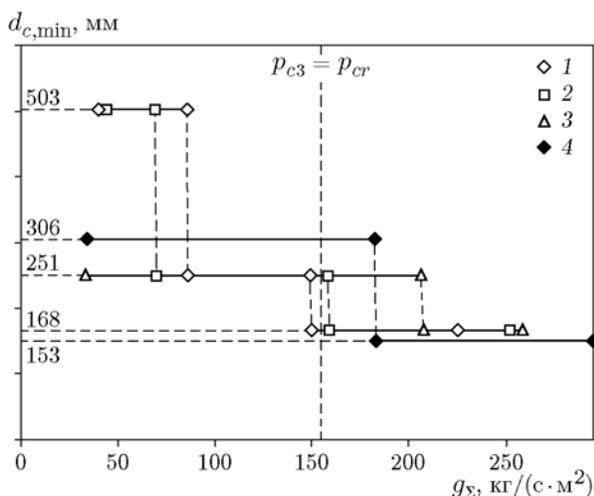


Рис. 11. Минимальный диаметр камер разной длины, в которых может существовать одна ПДВ в смеси СО + Н₂ + воздух:

1 — $L_c = 540$ мм, 2 — 293 мм, 3 — 153 мм; 4 — камера ДК-300 ($L_c = 525$ мм)

ками 1–4 соответствуют одинаковому количеству ПДВ по окружности камеры сгорания в данном диапазоне удельных расходов ТВС g_Σ , а скачки между ними — смене количества волн. Верхняя линия соответствует одной, средние — двум, а нижние — трем волнам. Деление диаметра окружности камеры d_c на число волн определяет минимальный диаметр камеры $d_{c,min}$ в данном диапазоне g_Σ . Видно, что увеличение g_Σ приводит к уменьшению диаметра $d_{c,min}$, необходимого для реализации одноволновой НСД. В области докритического истечения продуктов и ударно-волнового воздействия из окружающей среды $40 < g_\Sigma < 90$ кг/(с·м²) оценка дает диапазон минимальных диаметров $250 < d_{c,min} < 503$ мм. При $90 < g_\Sigma < 160$ кг/(с·м²) минимальный диаметр НСД уменьшается до $250 < d_{c,min} < 306$ мм. При $160 < g_\Sigma < 210$ кг/(с·м²) он находится в диапазоне $168 < d_{c,min} < 250$ мм, а при $210 < g_\Sigma < 260$ кг/(с·м²) минимальный диаметр камеры равен $d_{c,min} \approx 150 \div 170$ мм.

При работе детонационной камеры в режиме НСД с увеличением удельного расхода ТВС уменьшается размер фронта ПДВ h , поэтому, как показали описанные выше результаты экспериментов, длина камеры может быть уменьшена до $L_c \approx h$. Например, для смеси СО/Н₂ — воздух при сверхкритическом истечении продуктов детонации в диапазоне $g_\Sigma = 150 \div 260$ кг/(с·м²), когда $h \approx 130 \div 200$ мм, достаточно применять кольцевую детонационную камеру длиной $L_c = 153 \div 200$ мм.

Отметим также, что с увеличением содержания водорода в составе синтез-газа (до 2Н₂ и 3Н₂) при $g_\Sigma > 260$ кг/(с·м²) реализуются четыре ПДВ, поэтому минимальный диаметр камеры, в которой может распространяться одноволновая НСД, уменьшится до $d_{c,min} = 100 \div 125$ мм. С дальнейшим ростом удельного расхода смеси возможно формирование слоя ТВС, который будет меньше критического размера. В результате произойдет срыв режима НСД, а следовательно, достижение нижнего предела по $d_{c,min}$.

Итак, в исследованных смесях синтез-газ — воздух увеличение g_Σ на порядок приводит к уменьшению $d_{c,min}$ почти в пять раз (до 100 мм).

ВЫВОДЫ

Исследование НСД смесей синтез-газ —

воздух в камере ДК-500 показало, что при одинаковых значениях удельного расхода воздуха число ПДВ возрастает с увеличением диаметра камеры сгорания. Аномалии могут возникать в области смены количества ПДВ. Показан эффект масштабируемости процесса НСД. В исследованных диапазонах длин камер и удельных расходов воздуха соответствующие частоты ПДВ не зависят от длины камеры, за исключением узких областей смены режимов по числу ПДВ. Структуры ПДВ при регулярных режимах НСД практически идентичны во всех смесях с исследуемыми составами синтез-газа, причем увеличение доли водорода в двухкомпонентном горючем приводит к увеличению скорости НСД и регулярности ее режимов. Иницирование детонации возможно от струи продуктов сгорания. Установлено, что при коэффициенте расширения $K_S = 5$ увеличение удельного расхода смесей синтез-газ — воздух до $g_\Sigma > 260 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ позволяет уменьшить минимальный диаметр кольцевой детонационной камеры до $100 \div 125 \text{ мм}$.

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., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Спиновая детонация топливовоздушной смеси в цилиндрической камере // Докл. РАН. — 2005. — Т. 400, № 3. — С. 338–340.
4. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация топливовоздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 107–115.
5. **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.
6. **Быковский Ф. А., Ждан С. А.** Современное состояние исследований непрерывной детонации топливовоздушных смесей (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 31–46.
7. **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.
8. **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. — N 2. — P. 555–582.
9. **Shank J. C.** Development and testing of a rotating detonation engine run on hydrogen and air // AFIT/GAE/ENY/12-M36: Thesis. — 2012.

Поступила в редакцию 5/II 2016 г.