

# НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ В РЕЖИМЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ПОДАЧИ ОКИСЛИТЕЛЯ

## 1. ОКИСЛИТЕЛЬ — КИСЛОРОД

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

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

Приведены результаты экспериментального исследования непрерывной спиновой и пульсирующей детонации водородокислородных и ацетиленокислородных смесей в проточной кольцевой камере диаметром 10 см с расширением канала в режиме эжекции окислителя. При сравнении с механической аналогией поршневого насоса установлено, что насосом для окислителя является детонационная волна, а всасывающим поршнем — волна разрежения. В условиях эксперимента наблюдались устойчивые режимы непрерывной спиновой детонации с одной поперечной детонационной волной: для водорода — со скоростью  $D = 1.76 \div 1.6$  км/с, для ацетилена —  $D = 1.46 \div 1.2$  км/с. Частота пульсирующей детонационной волны в смеси  $\text{H}_2\text{—O}_2$  составляла  $7.3 \div 5$  кГц, а в смеси  $\text{C}_2\text{H}_2\text{—O}_2$  около 2.5 кГц.

Ключевые слова: эжекция окислителя, непрерывная спиновая детонация, пульсирующая детонация, камера сгорания проточного типа, структура течения.

### ВВЕДЕНИЕ

Ранее было показано [1, 2], что в проточной камере сгорания с расширением канала и принудительной подачей компонентов непрерывная спиновая детонация может распространяться в дозвуковом потоке окислителя. Образование смеси перед фронтом поперечной детонационной волны (ПДВ) происходило в волне разрежения, примыкающей к фронту. В работах [3, 4] было обнаружено, что в камере подобной геометрии непрерывная спиновая детонация может существовать при среднем статическом давлении в начале камеры, меньшем, чем давление окружающей среды. При этом давление перед фронтом ПДВ должно быть, согласно расчетам по моделям [5–7], в 2–3 раза меньше среднего статического давления в камере. То есть из анализа результатов работ [1–7] сформировались предпосылки для поиска режимов непрерывной детонации без принудительной подачи окислителя в камеру сгорания. Первые результаты, показавшие принципиальную возможность осуществления непрерывного детонационного горения топлива в проточной камере в режиме эжекции окислителя, частично опубликованы в [8].

Цель данной работы — продолжить и обобщить результаты исследования по детонационному сжиганию топлива в режиме эжекции окислителя в камере проточного типа. Подобный режим работы камеры имеет важное практическое значение, так как позволяет производить ее запуск при нулевой скорости потока. В качестве окислителя использовался газообразный кислород, в качестве горючего — водород или ацетилен.

### 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились в камере осесимметричной кольцевой геометрии 1 диаметром  $d_c = 10$  см, длиной  $L_c = 10$  см и начальной шириной канала  $\Delta = 0.5$  см. Вниз по потоку канал расширялся под углом  $8.5^\circ$  (рис. 1). Кислород подавался в камеру из объема 2 ( $V_0 = 2.8$  л) через кольцевую щель 3 шириной  $\delta = 1.25$  или 1.75 мм (проходное сечение  $S_\delta = 3.5$  или 5 см<sup>2</sup> соответственно). Объем 2 представлял собой пространство, ограниченное стенками головки камеры и металлическим кожухом, имеющим выход в атмосферу через кольцевое отверстие 4 площадью  $S_a = 200$  см<sup>2</sup>. Этот объем заполнялся кислородом из ресивера объемом  $V_{r,ox} = 0.72$  л через клапан с проходным сечением 5 площадью 1.1 см<sup>2</sup>. Горючее подавалось из ресивера объемом  $V_{r,f} = 1.75$  л через отверстия форсунки 6, направленные вниз по потоку

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по программе № 12.6 Президиума РАН и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ 1886.2008.1).

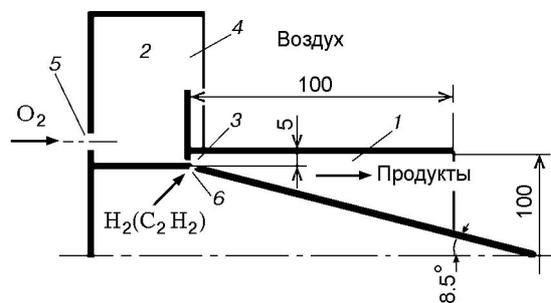


Рис. 1. Схема камеры:

1 — камера, 2 — объем для кислорода, 3 — щель для подачи кислорода в камеру, 4 — кольцевое отверстие, 5 — отверстие для подачи кислорода в объем 2, 6 — форсунка горючего

под углом  $45^\circ$  к оси и равномерно распределенные по внутренней стенке камеры на расстоянии 0.5 мм от щели для подачи окислителя. Детонация смеси, образующейся в камере 1, инициировалась пережиганием проволоочки, расположенной на расстоянии 40 мм от щели 3. Продукты детонации выбрасывались в атмосферу. Фоторегистрация процесса проводилась через продольное окно из оргстекла длиной 8.7 см и шириной 0.8 см, расположенное в стенке камеры (на рисунке не показано). Для подсветки детонации водородокислородной смеси со стороны торцевой части камеры 1 напротив окна впрыскивалась, аналогично [4], струйка ацетилена. Перед опытом аэрофотопленка высокой чувствительности выдерживалась в среде водорода в течение суток при давлении  $10^6$  Па. В опытах с компонентами ацетилен — кислород не требовалось использования данного способа подсветки и выдержки в среде водорода. Весь процесс регистрировался фоторегистратором с падающим барабаном [9] методом компенсации скорости [10] — движение изображения ПДВ и фотопленки совпадали по направлению. При этом ПДВ и течение в их окрестности фиксировались в системе волны, а продольные ударные и детонационные волны и течение продуктов — на развертку. Компьютерная система регистрировала сигналы датчиков давления газов: в ресиверах кислорода ( $p_{r,ox}$ ) и горючего ( $p_{r,f}$ ), в объеме 2 на входе щели ( $p_0$ ) и коллекторе горючего ( $p_{m,f}$ ), в камере на расстоянии 0.5, 4 и 8.7 см от переднего торца камеры ( $p_{c1}$ ,  $p_{c2}$  и  $p_{c3}$  соответственно).

Начальное давление водорода в ресивере устанавливалось  $p_{r,f0} = 15 \cdot 10^5$  или  $7 \cdot 10^5$  Па, ацетилена —  $p_{r,f0} = 5.5 \cdot 10^5$  Па. Расходы горю-

чего в течение опыта составляли: водорода —  $G_f = 14.4 \rightarrow 5.4$  г/с и  $6.6 \rightarrow 3.1$  г/с соответственно, ацетилена —  $G_f = 24.5 \rightarrow 16$  г/с (стрелкой показано направление изменения параметра в течение эксперимента). Начальное давление кислорода в ресивере во всех опытах выдерживалось постоянным —  $p_{r,ox0} = 8 \cdot 10^5$  Па. Расход кислорода в объем 2 из ресивера  $V_{r,ox} = 0.72$  л принимал значения  $G_{r,ox} = 97.2 \rightarrow 17$  г/с. Расход кислорода в камеру через кольцевой зазор 3 зависел от условий проведения опыта.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 2.1. Горючее — водород

Режимы сжигания водорода в непрерывных спиновых детонационных волнах удалось реализовать при установке щелевого зазора шириной  $\delta = 1.75$  мм ( $\delta/\Delta = 0.35$ ). При правильной организации эксперимента выброс продуктов в помещение из объема  $V_0$  отсутствовал.

Фрагменты типичной фоторегистрограммы процесса при  $\delta = 1.75$  мм и  $p_{r,f0} = 7 \cdot 10^5$  Па представлены на рис. 2 (а —  $\approx 1/10$  часть

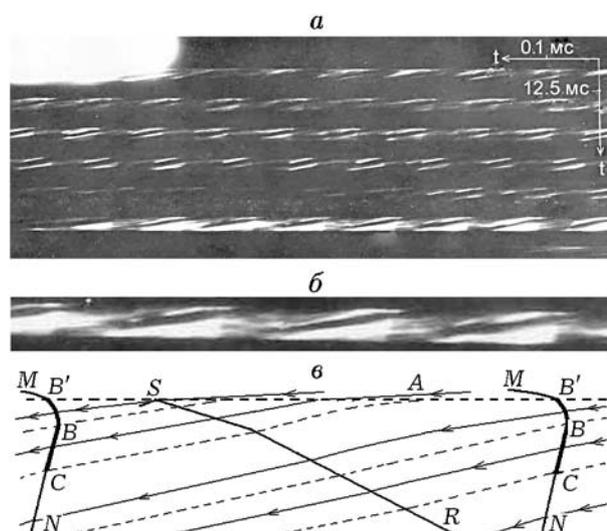


Рис. 2. Непрерывная детонация водородокислородной смеси в режиме эжекции кислорода (фрагменты фоторегистрограмм):

а — 1/10 часть процесса,  $\delta = 1.75$  мм,  $p_{r,f0} = 7 \cdot 10^5$  Па,  $G_f = 6.1 \rightarrow 3.4$  г/с,  $D = 1.76 \rightarrow 1.57$  км/с,  $n = 1$ ; б — 4 ПДВ; в — структура ПДВ и течение в ее окрестности

процесса,  $b$  — несколько ПДВ). Ширина дорожки соответствует длине окна в камере — 8.7 см. Устойчивый детонационный режим с одной ПДВ, движущейся слева направо, зафиксирован на 6 полных дорожках, что по времени составляет  $t_d \approx 75$  мс. Скорость детонации изменяется в диапазоне  $D = 1.76 \rightarrow 1.57$  км/с относительно наружной стенки кольцевого канала. Просматривается продольная ударная волна, идущая вверх по потоку до торца камеры и тормозящая поток продуктов. В месте отражения этой волны от торца, как правило, происходит воспламенение смеси. Поскольку в неподвижной системе координат весь ударно-детонационный комплекс вращается по окружности, то и продольная волна имеет тангенциальную составляющую скорости. По развертке движения светящихся частиц газа вдоль окна определялась осевая скорость газа в камере —  $v_z = k \operatorname{tg}(\theta) v_r$ , где  $k = 22.5$  — коэффициент уменьшения изображения,  $\theta$  — угол наклона развертки траектории к направлению движения пленки,  $v_r = 100$  м/с — ее скорость. Измеренная осевая скорость натекающей смеси перед продольной волной на границе с продуктами вблизи фронта ПДВ составляла в среднем  $v_{z,m} \approx 360$  м/с ( $\theta \approx 9^\circ$ ), а скорость продуктов вблизи выхода из расширяющейся камеры ( $v_{z,p}$ ) является существенно дозвуковой: сразу за ПДВ  $v_{z,p} \approx 400$  м/с ( $\theta = 10^\circ$ ), а за продольной ударной волной  $v_{z,p} \approx 200$  м/с ( $\theta \approx 5^\circ$ ).

На рис. 2,б приведена схема ПДВ с течением в ее окрестности, качественно соответствующая полученным фоторегистрограммам и очень похожая на ПДВ в дозвуковом потоке ацетиленокислородной смеси [1]. Детонационный фронт  $BC$  представляет собой косую волну, распространяющуюся по холодной смеси. Верхний участок фронта  $BB'$  движется по воспламенившейся смеси, в которой горение инициируется скачком уплотнения  $RS$  при отражении от торца камеры в точке  $S$ . Из-за недостаточно полного перемешивания компонентов вблизи торцевой поверхности детонационная волна  $BC$  в точке  $B$  переходит в ударную  $BB'$  и, вероятно, заходит через щелевой канал 3 в объем 2 косою волной  $B'M$ , которая останавливает течение кислорода в камеру. И только левее точки  $A$ , находящейся примерно на  $1/3$  периода между волнами, наблюдается поступление кислорода в камеру, вызванное уменьшением давления в волне разрежения за детонационным фронтом  $BC$ . За волной

$BB'$  компоненты продолжают перемешиваться и гореть, что проявляется по яркости свечения продуктов в этой области. Высота детонационного фронта  $B'C$  занимает половину длины камеры, т. е.  $h_d \approx 5$  см, а остальную часть камеры — шлейф  $CN$ , являющийся ударной волной в продуктах.

На рис. 3,а приведены осциллограммы давления в системе подачи водорода и кислорода, а на рис. 3,б — осциллограммы статического давления впереди и позади кольцевой щели 3 ( $p_0$  и  $p_{c1}$  соответственно, см. рис. 1) для эксперимента, фрагменты фоторегистрограммы которого представлены на рис. 2,а,б. Отметим, что средние статические давления кислорода в объеме 2 и смеси в камере меньше атмосферного на  $0.01 \div 0.02 \cdot 10^5$  Па и практически одинаковы. Лишь момент инициирования первоначально скопившейся смеси в камере отмечен резким подъемом давления. Давления в двух других точках камеры ( $p_{c2}$  и  $p_{c3}$ ) на рисунке не приведены, поскольку их профили близки к тем, что показаны на рисунке.

При повышенном расходе водорода

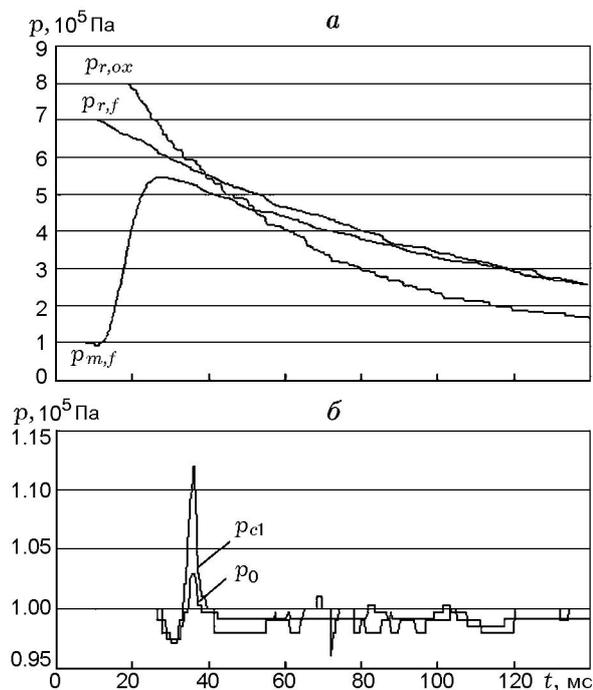


Рис. 3. Изменение давления в течение эксперимента:

а — в ресиверах водорода и кислорода, коллекторе водорода; б — давление впереди и позади щели подачи кислорода (соответствуют данным, приведенным на рис. 2,а)

( $p_{r,f0} = 15 \cdot 10^5$  Па) наблюдали режим продольной пульсирующей детонации, длительностью  $t_d = 120$  мс. Образующаяся горючая смесь сжигалась в отраженной от торца продольной волне, пульсирующей с частотой  $f = 6.2 \div 5$  кГц. Средние статические давления перед щелью подачи кислорода и в камере не отличались от наблюдаемых ранее.

При уменьшении размера щели до  $\delta = 1.25$  мм также был реализован режим продольной пульсирующей детонации. Более высоким значениям расходов водорода ( $p_{r,f0} = 15 \cdot 10^5$  Па) соответствовали повышенные частоты пульсаций —  $f = 7.3 \div 5.6$  кГц, а более низким ( $p_{r,f0} = 7 \cdot 10^5$  Па) —  $f = 6.7 \div 5.3$  кГц. Однако длительность детонационных режимов уменьшилась до  $t_d = 75$  и  $50$  мс соответственно. Кроме того, после продольной пульсирующей детонации в камере наблюдалось обычное горение.

Зависимости скорости непрерывной детонации  $D$  от удельных расходов водорода  $g_f = G_f/S_c$  приведены на рис. 4. Наблюдается монотонное снижение скорости детонации с уменьшением расхода водорода и ее затухание при достижении  $D \approx 1.5$  км/с.

## 2.2. Горючее — ацетилен

Режимы сжигания ацетилена в ПДВ удалось реализовать при обоих размерах щелевого зазора ( $\delta = 1.25$  и  $1.75$  мм) и выбранных условиях подачи ацетилена ( $p_{r,f0} = 5.5 \cdot 10^5$  Па) и кислорода ( $p_{r,ox0} = 8 \cdot 10^5$  Па). В камере с  $\delta = 1.75$  мм (рис. 5, а) сжигание горючей смеси происходило в одной ПДВ, движущейся со скоростью  $D = 1.46 \rightarrow 1.2$  км/с. Зависимости скорости непрерывной детонации от удельных расходов ацетилена  $g_f$  приведены на рис. 4. Фоторегистрограмма течения отличается от при-

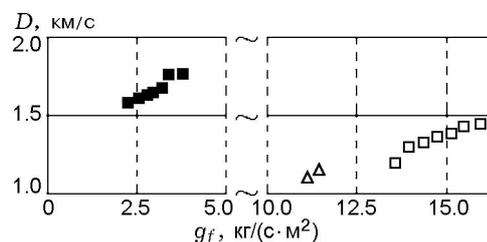


Рис. 4. Зависимости скорости непрерывной детонации от удельных расходов горючего:  
■ — водород,  $\Delta$  и  $\square$  — ацетилен

веденной на рис. 2 яркостью свечения, а структура — смыканием фронта ПДВ (точки  $B'$ ) с точкой  $S$  отражения скачка  $RS$  от торца камеры. Высота детонационного фронта  $B'C$  занимала также половину длины камеры —  $h_d \approx 5$  см. Скорость натекающей смеси до попадания в волну  $RS$  составляла  $v_{z,m} = 320$  м/с ( $\theta \approx 8^\circ$ ), а на выходе из камеры ненамного превышала это значение за шлейфом  $CN$  —  $v_{z,p} \approx 360$  м/с и была значительно ниже за продольной волной  $RS$  —  $v_{z,p} \approx 160$  м/с.

Через  $t_d \approx 84$  мс после инициирования непрерывная спиновая детонация стала неустойчивой, усилился продольный скачок уплотнения  $RS$ , и детонация перешла в режим пульсирующей с продольными волнами (рис. 5, б), движущимися вверх по потоку с частотой  $f \approx 2.5$  кГц. При этом поперечный фронт  $BC$  прекращал свое существование, а продольный скачок уплотнения  $RS$  усиливался до детонационных параметров. В пульсирующем детонационном режиме запаздывание поступления кислорода в камеру охватывало  $2/3$  периода между продольными волнами. Двойная задержка по времени поступления в камеру кислорода при пульсирующей детонации указывает на более существенное воздействие продольной детонационной волны на подачу кислорода, чем «скользящей» волны при непрерыв-

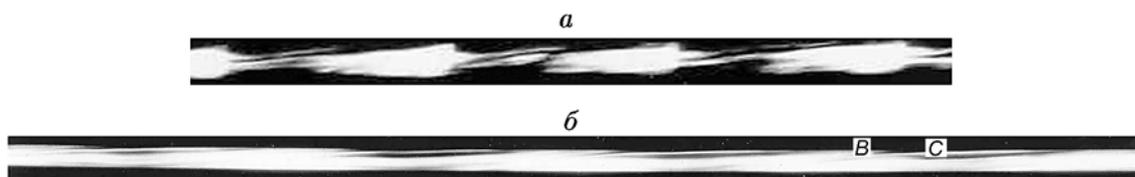


Рис. 5. Непрерывная и пульсирующая детонация ацетиленокислородной смеси в режиме эжекции кислорода (фрагменты фоторегистрограмм):

а — непрерывная детонация (4 ПДВ),  $\delta = 1.75$  мм,  $G_f = 22$  г/с,  $D = 1.36$  км/с,  $n = 1$ ; б — пульсирующая детонация (4 продольные волны),  $G_f = 18$  г/с,  $f = 2.5$  кГц

ной спиновой детонации. Наклон границы раздела между натекающей смесью и продуктами уменьшился до  $5^\circ$ , причем доля периода времени втекания смеси в камеру сократилась более чем в два раза.

При установке щели шириной  $\delta = 1.25$  мм было зафиксировано только начало процесса (в течение 10 мс) с двумя ПДВ, имеющими скорость  $D = 1.2 \rightarrow 1.1$  км/с.

### 3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отметим, что в камере проточного типа режимы сжигания топлив в поперечных (спиновых) и продольных детонационных волнах в режиме автоколебательной эжекции окислителя осуществлены впервые.

Наиболее важным результатом работы является экспериментальное подтверждение возможности существования непрерывной спиновой и пульсирующей детонации в эжекторах. Известные типы эжекторов [11, 12] работают за счет градиента давления, образующегося между струей истекающего из сопла газа и газа во внешней среде. Из рис. 3, б следует, что при одномерном течении в условиях классического эжектора вообще нельзя говорить о наличии эжекции, так как статические средние давления на входе и выходе камеры одинаковы и находятся на уровне давления окружающей среды. Поскольку режимы непрерывной спиновой и пульсирующей детонации реализуются и всасывание кислорода происходит, необходимо выяснить механизм всасывания наружного газа в камеру сгорания.

В работе [1] было показано, что в режимах непрерывной спиновой или пульсирующей детонации поток кислорода, принудительно поступающий в камеру с расширяющимся сечением со средней скоростью 25 м/с, разгонялся в волне разрежения до скорости 300 м/с. Для обеспечения таких скоростей необходим, по крайней мере, двойной перепад давления между каналом подачи и камерой в области распространения фронта детонационной волны. Согласно результатам расчетов, полученным на основе физико-математических моделей непрерывной детонации в камерах типа ракетных двигателей [4–7], статическое давление перед фронтом непрерывной детонационной волны в 2–3 меньше, чем среднее давление в камере. Поскольку структура ПДВ в проточном варианте камеры существенно не отличается от структуры в случае подачи кислоро-

да через форсунки, то при эжекции со средним давлением в камере  $10^5$  Па статическое давление перед фронтом ПДВ может составлять  $p_{c1} \approx p_{c2} = (0.5 \div 0.3) \cdot 10^5$  Па и вполне способно обеспечить наблюдаемую скорость смеси  $v_{z,mix} = 320 \div 360$  м/с. Таким образом, в режиме нестационарной автоколебательной эжекции кислорода детонационная волна выполняет роль насоса, а примыкающая к детонационному фронту волна разрежения — всасывающего поршня.

В работе [1] также отмечалось, что самоподдерживающийся режим пульсирующей детонации с продольными волнами реализовывался в том случае, когда размер слоя  $B'S$  становился меньше критического для непрерывной спиновой детонации, например, при переходе к камере меньшего диаметра или уменьшении химической активности смеси, а также при ее чрезмерном выгорании перед волной. Воздействие прямой волны на поток кислорода оказывалось более жестким, чем «скользящей» при непрерывной спиновой детонации, что приводило к большей задержке поступления в камеру кислорода. В режимах автоколебательной эжекции окислителя физика детонационного процесса аналогична описанной в работе [1] с той лишь разницей, что кислород имел нулевую начальную скорость и отсутствовала система его нагнетания в камеру. Все физические явления по обновлению смеси в камере для пульсирующей и непрерывной спиновой детонации близки. Отметим, что модель пульсирующей детонации также выделяет зону разрежения за отраженной от непроницаемой стенки детонационной волной [13].

Поток продуктов из кольцевой камеры сгорания в осевом направлении неизбежно вызывает силу реакции  $P$ , действующую на камеру, и приводит к появлению удельного импульса  $J = P / (G_{\delta,ox} + G_f) = v_{z,p}$  [11]. В случае непрерывной спиновой детонации оценка удельного импульса дает значение  $J \approx 400 \div 200$  м/с, а в режиме пульсирующей детонации — в два раза меньше. Полученные экспериментальные данные имеют практическое значение, так как появляется возможность развития силы тяги у прямоточного реактивного двигателя при нулевой начальной скорости (движение с места). Не исключено использование нестационарной автоколебательной эжекции окислителя без специальных механических устройств в энергетических установках непрерывного дето-

национного сжигания топлив с целью получения тепла, а также в химических реакторах.

При анализе результатов экспериментов существуют трудности в оценках расхода кислорода, поступающего в камеру сгорания, поскольку нет методик и, тем более, приборов для его измерения в условиях высокочастотной нестационарной автоколебательной подачи. В определении расходов ацетилена и водорода трудностей не возникает, так как используется проверенная методика, основанная на записи давления в ресивере конечного объема во время истечения [14].

В условиях стационарной эжекции кислорода, которая реализуется до момента инициирования детонации, такие оценки трудности не представляют. При заполнении объема 2 кислородом через щель 3 вытекает количество газа, примерно пропорциональное отношению  $S_\delta/S_a = 0.0175$  для  $\delta = 1.25$  мм и  $S_\delta/S_a = 0.025$  при  $\delta = 1.75$  мм (см. рис. 1). Когда открывается клапан горючего и через форсунку 6 начинает поступать водород или ацетилен, в камере вблизи щели 3 появляется разрежение. Датчик, измеряющий статическое давление на расстоянии 5 мм от торца камеры и работающий на пределе чувствительности, фиксирует уменьшение давления по отношению к атмосферному в пределах  $\Delta p_\delta = (0.01 \div 0.025) \cdot 10^5$  Па. Такие перепады давления на щели способны обеспечить скорости потока кислорода через щель  $v_{\delta,ox} = (2\Delta p_\delta/\rho_{ox})^{0.5} = 38.5 \div 60.8$  м/с, где  $\rho_{ox} = 1.35$  кг/м<sup>3</sup> — плотность кислорода при температуре 20 °С (сжимаемостью газа можно пренебречь). При этом расход кислорода через щель шириной  $\delta = 1.75$  мм ( $S_\delta = 5$  см<sup>2</sup>) находится в диапазоне  $G_{\delta,ox} = v_{\delta,ox}\rho_{ox}S_\delta\mu = 23.1 \div 36.5$  г/с, где  $\mu = 0.9$  [15] — коэффициент расхода. Через щель шириной  $\delta = 1.25$  мм ( $S_\delta = 3.5$  см<sup>2</sup>) расходы будут в 1.4 раза меньше. Приведенная оценка расходов кислорода имеет значение лишь для определения детонационной способности образующейся в камере смеси. Так как в момент инициирования расход водорода составлял  $G_f = 14$  или 6 г/с, то согласно нашим оценкам коэффициент избытка горючего  $\phi$  при истечении кислорода из щели  $\delta = 1.75$  мм находится в диапазоне  $\phi = 4.5 \div 3.07$  или  $2.08 \div 1.31$ . Для щели  $\delta = 1.25$  мм соответственно  $\phi = 3.2 \div 2.2$  и  $1.5 \div 0.94$ . Все приведенные значения  $\phi$  принадлежат детонационно-способным водородокислородным смесям при начальном давлении  $p_a = 10^5$  Па и легко инициируются

энергией 5 Дж, выделяющейся при пережигании проволочки (см. рис. 2, а, яркая вспышка на первой дорожке). В случае использования ацетилена образуется смесь с  $\phi = 4.5 \div 2.02$ , которая является детонационно-способной и легко инициируется указанной выше энергией.

Оценим расходы кислорода при возникновении режима непрерывной детонации, основываясь на анализе фоторегистрограмм и схемы течения (см. рис. 2). Из фоторегистрограмм видно, что структура волн и течение в их окрестности во время эксперимента не претерпевают существенных изменений. Поэтому с большой степенью вероятности можно считать, что истечение кислорода через щель наступает примерно через 1/3 периода между ПДВ (справедливо для обеих смесей H<sub>2</sub>—O<sub>2</sub> и C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>—O<sub>2</sub>). Предположим, что критическое истечение кислорода в среднем охватывает 1/2 периода. Тогда  $G_{\delta,ox} = (1/2)S_\delta\mu\rho_*v_*$ . Для щели  $\delta = 1.75$  мм ( $S_\delta = 5$  см<sup>2</sup>) при коэффициенте расхода щели  $\mu = 0.9$ , критических значениях плотности  $\rho_* = 0.634\rho_{ox} = 0.856$  г/л и скорости  $v_* = c_* = 300$  м/с находим  $G_{\delta,ox} = 58 \pm 10$  г/с. Для волн идентичной структуры эти расчетные значения расхода будут одинаковыми. Тогда для зазора  $\delta = 1.75$  мм и водородокислородной смеси за время  $t_d = 75$  мс реализуются значения  $\phi = 0.84 \div 0.47$  ( $G_f = 6.06 \rightarrow 3.4$  г/с), а для ацетиленокислородной за время  $t_d = 84$  мс —  $\phi = 1.28 \div 1.06$  ( $G_f = 24.5 \rightarrow 20.3$  г/с).

Расход кислорода можно также оценить, не вдаваясь в детали структуры течения и используя ресивер для кислорода в качестве инструмента. При этом достаточно знать время детонации  $t_d$ , определяемое по фоторегистрограмме всего процесса. В опытах с водородокислородной смесью наблюдается достаточно резкое прекращение детонации (см. рис 2, а), которое может быть объяснено двумя причинами: прекращением подачи кислорода в камеру или достижением концентрационного предела по  $\phi$  в ту и другую сторону. Нижний концентрационный предел обычной детонации небольшой ( $\phi \approx 0.1$  [16]), а верхний — не соответствует малым наблюдаемым скоростям детонации, поэтому окончание процесса свяжем с расходом кислорода, поступившего в объем  $V_0$  из ресивера  $V_{r,ox}$ .

Масса кислорода, поступившая в объем до прекращения детонации, находилась с помощью интегрирования текущего расхода из ресивера по времени —

$$\begin{aligned}
 m_{r,ox} &= \int_0^{t_e} G_{r,ox} dt = \\
 &= \int_0^{t_e} G_{r,ox0} (1 + ct)^{-(\gamma+1)/(\gamma-1)} dt = \\
 &= G_{r,ox0} (\gamma - 1) / (2c) [1 - (1 + ct_e)^{-2/(\gamma-1)}],
 \end{aligned}$$

где  $G_{r,ox0} = 2V_{r,ox}\rho_{ox}c/(\gamma - 1)$  — начальный расход кислорода из ресивера;  $c = [(p_{r,ox}/p_{r,ox0})^{-(\gamma-1)/2\gamma} - 1]/t$  — коэффициент расхода системы подачи, определяемый по осциллограмме давления в ресивере (см. рис. 3, а);  $p_{r,ox0}$  — начальное давление кислорода в ресивере;  $t$  — текущее время;  $t_e$  — время истечения кислорода до момента прекращения детонации;  $\gamma = 1.4$  — отношение удельных теплоемкостей.

На рис. 6 приведены данные расчета, соответствующие истечению кислорода в режиме подачи водорода с  $p_{r,f0} = 7 \cdot 10^5$  Па (см. рис. 2, а). Расходы отнесены к значению  $G_{r,ox0} = 97.2$  г/с, а масса — к массе поступившего в объем 2 кислорода  $m_{r,ox} = 5.05$  г за время  $t_e = 93.4$  мс (обозначены штрихом). До начала инициирования ( $t_i = 18$  мс) из объема  $V_0$  в камеру поступило кислорода  $m_i = G_{\delta,ox}t_i \approx 30 \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 0.54$  г. Тогда за время детонации  $t_d = t_e - t_i = 75$  мс в камеру может поступить не более чем  $m_d = 4.5$  г со средним расходом не более чем  $G'_{\delta,ox} = m_d/t_d = 60$  г/с. Это значение расхода хорошо коррелирует с оценкой, полученной выше по структуре ПДВ.

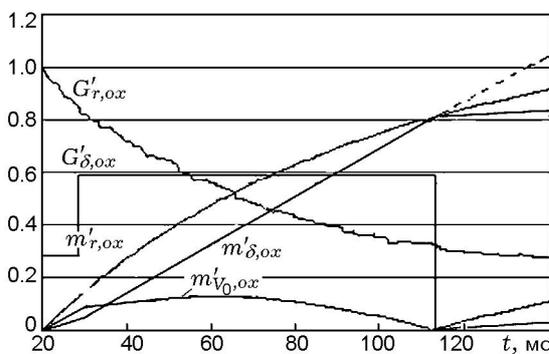


Рис. 6. Масса кислорода ( $m'_{r,ox}$  — поступившая из ресивера,  $m'_{V_0,ox}$  — скопившаяся перед щелью подачи кислорода,  $m'_{\delta,ox}$  — прошедшая через щель) и расходы кислорода ( $G'_{r,ox}$  — из ресивера,  $G'_{\delta,ox}$  — через щель)

При повышенных расходах водорода, когда осуществлялась продольная пульсирующая детонация, наблюдалось слабое свечение продольных волн и продуктов детонации, поэтому по фоторегистрограммам за период пульсаций трудно обнаружить начало поступления кислорода в камеру. Кроме того, пульсирующий режим детонации плавно переходил в режим горения, поэтому невозможно оценить массу газа, прошедшую через камеру во время реализации режима продольной пульсирующей детонации. Для ацетиленокислородной смеси свечение волн и продуктов было более интенсивное, поэтому переход от непрерывной спиновой детонации к пульсирующей отчетливо обозначился. Длительность пульсирующей детонации определялась путем вычитания из общего времени процесса периода существования непрерывной спиновой детонации и преддетонационного периода —  $t_{dp} = t_e - t_d - t_i$ , масса поступившего в камеру кислорода вычислялась аналогично — за вычетом масс за указанные периоды. В результате такой оценки средний расход кислорода составил  $G_{r,ox} \approx 16$  г/с, при этом  $\phi \approx 3.75 \div 2.9$  ( $G_f = 19.8 \rightarrow 15.3$  г/с).

Очевидно, существует оптимальная ширина щели, при которой реализуются наиболее сильные волны. С увеличением ширины щели  $\delta$  повышается расход кислорода, но ухудшается перемешивание смесевых компонентов смеси и увеличивается влияние ПДВ на расход кислорода. С другой стороны, уменьшение  $\delta$  ниже определенного предела не обеспечивает необходимого расхода кислорода для существования непрерывной детонации. Действительно, при установке щели шириной  $\delta = 1.25$  мм вместо  $\delta = 1.75$  мм длительность процесса уменьшалась в 1.5 раза, причем в водородокислородных смесях реализовывались лишь режимы пульсирующей детонации, а при меньших расходах горючего — режимы обычного горения, которые ранее не наблюдались [8].

При непрерывной детонации во время запыриания потока кислорода (примерно на 1/3 периода между ПДВ, см. рис. 2, а) течение горючего продолжается, так как перепад давления на форсунках сверхкритический, и лишь на очень короткое время непосредственно за фронтом ПДВ (не более 0.1 периода) его истечение приостанавливается. Таким образом, в камере на одном периоде образуются две трубки тока, из которых одна переобогащена горючим относительно среднего значения  $\phi$  (ее границы

проходят через точки  $A$  и  $B'$ ), другая — обеднена горючим (проходит через фронт  $CBV'$ ). Поскольку продукты во фронте  $CBV'$  образовались при недостатке горючего, то за фронтом они частично догорают, точнее, переходят в равновесие в соответствии со средним значением  $\phi$ , в режиме турбулентного пламени по мере проникновения горючего в поток продуктов. Это явление отражается на интенсивности свечения процесса, особенно при непрерывной детонации водородокислородной смеси: продукты обычного горения светятся ярче, чем продукты детонации, поэтому наблюдается характерная слоистая структура течения. В продуктах детонации ацетиленокислородной смеси хорошо светятся обе трубки тока и в потоке не выделяются.

В случае пульсирующей детонации ацетиленокислородной смеси (см. рис. 5, б) время истечения кислорода ограничено примерно  $1/4$  периода, скорость поступления смеси в камеру также снижена наполовину ( $\theta \approx 4^\circ$ ), поэтому расход кислорода  $G_{\delta,ox}$  уменьшается вчетверо (до 15 г/с) и образующаяся смесь становится богатой по ацетилену —  $\phi = 4.4 \div 3.6$  (если считать  $G_{\delta,ox} \approx \text{const}$ ). Таким образом, при пульсирующей детонации снижается всасывание кислорода из окружающей среды по сравнению с непрерывно вращающейся детонационной волной.

### ВЫВОДЫ

- В проточной кольцевой камере впервые при нестационарной эжекции окислителя реализованы устойчивые режимы непрерывной спиновой и пульсирующей детонации смесей  $H_2—O_2$  и  $C_2H_2—O_2$ . По аналогии с поршневым насосом показано, что насосом для окислителя является детонационная волна, а всасывающим поршнем — волна разрежения.

- Рассмотрена структура спиновых и пульсирующих детонационных волн и течения в их окрестности.

- Проведены оценки расходов эжектируемого кислорода. При пульсирующей детонации снижается эффект всасывания кислорода из окружающей среды по сравнению с непрерывно вращающейся детонационной волной.

- Показано, что за период между смежными волнами концентрации горючего в смеси, поступающей в камеру сгорания как при непрерывной спиновой, так и при пульсирующей детонации, различаются.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная детонация дозвукового потока топлива // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 3. — С. 93–104.
2. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Реализация и моделирование непрерывной спиновой детонации водородокислородной смеси в камерах проточного типа. 2. Камера с расширением кольцевого канала // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 6. — С. 91–104.
3. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** О непрерывной спиновой детонации топлив в кольцевых камерах сгорания // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 4. — С. 99–109.
4. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 107–115.
5. **Быковский Ф. А., Митрофанов В. В.** Детонационное сжигание газовой смеси в цилиндрической камере // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 5. — С. 107–117.
6. **Ждан С. А., Мардашев А. М., Митрофанов В. В.** Расчет течения спиновой детонации в кольцевой камере // Физика горения и взрыва. — 1990. — Т. 26, № 2. — С. 91–95.
7. **Ждан С. А., Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Математическое моделирование вращающейся волны детонации в водородокислородной смеси // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 4. — С. 90–101.
8. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная детонация в режиме нестационарной эжекции окислителя // Докл. АН. — 2009. — Т. 424, № 1. — С. 40–42.
9. **Быковский Ф. А.** Высокоскоростной ждущий фоторегистратор // Журн. науч. и приклад. фотографии и кинематографии. — 1981. — № 2. — С. 85–89.
10. **Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е.** Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
11. **Дейч М. Е.** Техническая газодинамика. — М.: Энергия, 1974.
12. **Абрамович Г. М.** Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1976.
13. **Ждан С. А., Митрофанов В. В., Сычев А. И.** Величина реактивного импульса от взрыва газовой смеси в полуограниченном пространстве // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 5. — С. 90–97.
14. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Исследование непрерывной спиновой детонации водородокислородных смесей. 3. Методики измерения параметров потока и структура течения в

- камерах различной геометрии // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 87–97.
15. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Коэффициенты расхода насадков и их комбинаций при прямом и обратном течении // ПМТФ. — 1996. — Т. 37, № 4. — С. 98–104.
16. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1968.

*Поступила в редакцию 1/VII 2009 г.*

---