

НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ ВОДОРОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ДОБАВКОЙ ВОЗДУХА В ПРОДУКТЫ И ЗОНУ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ

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 в проточной кольцевой цилиндрической камере наружного диаметра 30.6 см. Изучалось влияние добавки воздуха в продукты непрерывной спиновой детонации водородовоздушной смеси и в зону смесеобразования на параметры детонационных волн, на давление в камере и удельный импульс. Область реализации непрерывной спиновой детонации водородовоздушной смеси расширена до удельных расходов смеси $560 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и коэффициента избытка горючего $0.5 \div 4.4$. Показано, что добавка воздуха снижает скорость детонации, увеличивает давление в камере и тягу, уменьшает удельный расход топлива. При этом возрастают потери полного давления, связанные с процессом смешения и подводом тепла к более холодному газу. В камере сгорания исследуемой геометрии минимальное достигнутое значение удельного расхода водорода составило $0.04 \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{Н})$.

Ключевые слова: камера сгорания, детонационная волна, непрерывная спиновая детонация, топливно-воздушная смесь, удельный импульс, удельный расход топлива, потери давления торможения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся работы по созданию научных основ импульсных детонационных двигателей, в которых топливо периодически [1] или непрерывно [2] сжигается в бегущей детонационной волне. Определенный интерес представляет реализация непрерывной спиновой детонации топливно-воздушных смесей в условиях, близких к воздушно-реактивным двигателям. В проточных камерах кольцевой цилиндрической геометрии при подаче воздуха в камеру сгорания сплошным потоком был реализован и исследован режим непрерывной спиновой детонации в ацетиленовоздушной [3] и водородовоздушной [4] смесях. Это открыло возможность планомерных и всесторонних исследований свойств и особенностей режима непрерывной спиновой детонации применительно к воздушно-реактивному двигателю.

Экономичность, экологичность и надежность — вот основные требования, предъявляемые к двигателям и энергетическим установкам. Одним из путей повышения этих качеств воздушно-реактивного двигателя явля-

ется использование добавочного воздуха в рабочем цикле — подмешивание его в продукты сгорания или создание дополнительной тяги за счет вентилятора в дополнительной контуре (двухконтурные двигатели) [5, 6]. В настоящее время степень двухконтурности $m = G_{A2}/G_{A1}$ (отношение расхода воздуха в добавочном контуре G_{A2} к расходу в основном контуре G_{A1}) достигла значения 4 и более, а удельный расход углеводородного топлива (количество топлива, необходимого для создания силы тяги 1 Н в течение часа) — $g_f = G_f/F = 0.03 \div 0.035 \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{Н})$ [6].

Цель настоящей работы — выяснить влияние добавки воздуха в продукты детонации и в зону смесеобразования на протекание процесса непрерывной спиновой детонации; на значения полного и удельного импульса, а также удельного расхода топлива; на потери полного давления в камере.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проведены в проточной кольцевой цилиндрической камере наружного диаметра $d_c = 30.6 \text{ см}$, длиной $L_c = 87, 21.5$ или 17.5 см , с расстоянием между стенками $\Delta = 2.3 \text{ см}$ (рис. 1). Воздух в камеру 1 поступал через кольцевую щель 2 шириной $\delta = 0.2 \text{ см}$ из коллектора 3, водород — из коллектора 4

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 05-01-00298, 07-01-00174) и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-1886.2008.1).

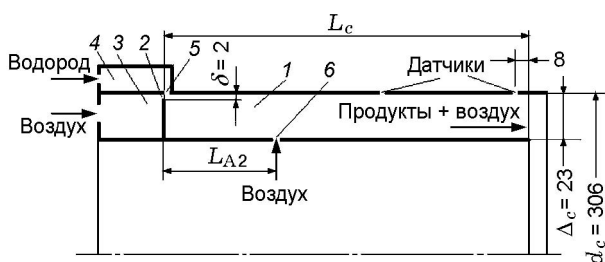


Рис. 1. Схема камеры:

1 — камера, 2 — кольцевая щель, 3 — коллектор воздуха, 4 — коллектор водорода, 5, 6 — форсунки

через форсунку 5, представляющую собой отверстия, равномерно расположенные по окружности наружной стенки камеры на расстоянии $L_f = 0.1$ см от щели подачи воздуха. На расстоянии $L_{A2} = 27, 15$ или 9 см через форсунку 6 с отверстиями, равномерно расположенными по внутренней стенке камеры, перпендикулярно потоку продуктов дополнительно подавался холодный воздух. Его добавочная подача в зону смесеобразования производилась через ту же щель ($\delta = 0.2$ см) путем увеличения давления подачи. Поскольку водород и воздух поступали из ресиверов конечного объема (для водорода — $V_{rH} = 13.3$ л, основной подачи воздуха — $V_{rA1} = 79.8$ л, дополнительной — $V_{rA2} = 43$ л), то в течение эксперимента, который длился около 0.4 с, параметры процесса непрерывно менялись. Начальные давления в ресиверах варьировались в пределах: для водорода — $p_{H0} = (50 \div 100) \cdot 10^5$ Па, воздуха в основной и дополнительной системах подачи — $p_{A10} = (23 \div 100) \cdot 10^5$ Па и $p_{A20} = (74 \div 10) \cdot 10^5$ Па соответственно. При этом расходы компонентов изменялись в диапазонах: водород — $G_H = 0.88 \div 0.04$ кг/с, воздух — $G_{A1} = 8.6 \div 1.6$ кг/с, $G_{A2} = 8.85 \div 0.28$ кг/с, как в течение эксперимента, так и от опыта к опыту. Эксперименты проведены в широком диапазоне значений коэффициента избытка горючего ϕ_1 без добавки ($\phi_1 = 4.4 \div 0.5$) и с добавкой воздуха в продукты ($\phi_1 = 1.6 \div 0.5$). Отношение добавочного расхода воздуха к основному варьировалось в диапазоне $\alpha = G_{A2}/G_{A1} = 3.3 \div 0.14$, а общий коэффициент избытка горючего составлял $\phi_\Sigma = \phi_1/(1 + \alpha) = 0.28 \div 1.0$. Компоненты смеси подавались в камеру в следующем порядке: сначала поступал водород, затем воздух по основной системе подачи, а через несколько миллисекунд (иногда десятков миллисекунд) — добавочный воздух.

Процесс непрерывной спиновой детонации инициировался пережиганием полоски из алюминиевой фольги электрическим током с затратой энергии ≈ 5 Дж. Инициатор находился на расстоянии 15 см от торца камеры. Время инициирования синхронизировалось с подачей воздуха по основной системе подачи. Выброс продуктов производился в атмосферу ($1.013 \cdot 10^5$ Па). Весь процесс фотографировался аналогично работе [4]. Измерялись давления в ресивере водорода (p_H), ресиверах основной (p_{A1}) и дополнительной (p_{A2}) подачи воздуха, в коллекторах водорода (p_{mH}) и системе основной подачи воздуха (p_{mA1}), статические давления в камере в области вращения детонационной волны на расстоянии $1.5, 7$ и 10 см от торца камеры (p_{c1}, p_{c2} и p_{c3}), полные (с помощью трубок Пито) и статические давления на расстоянии 1.5 и 5 см от места подачи добавочного воздуха (p_{04} и p_4), полные и статические давления на выходе из камеры (p_{05} и p_5) (см. рис. 1). Тарировка датчиков проводилась одновременно в динамическом режиме со временем нарастания давления 10 мс, что повышало достоверность результатов. Сигналы регистрировались и обрабатывались компьютерной системой. Давления, расходы компонентов смеси, скорость детонации и скорости светящихся частиц вдоль окна определялись по методикам, изложенным в работе [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Камера длиной $L_c = 87$ см ($L_{A2} = 27$ см)

На рис. 2 приведен фрагмент типичной фоторегистрограммы при начальных условиях в системе подачи $p_{H0} = 50 \cdot 10^5$ Па, $p_{A10} = 23 \cdot 10^5$ Па, $p_{A20} = 40 \cdot 10^5$ Па. В течение опыта расход водорода изменялся в пределах $G_H = 0.106 \rightarrow 0.04$ кг/с, воздуха в основной и дополнительной системах подачи — в диапазонах $G_{A1} = 2.8 \rightarrow 1.6$ кг/с и $G_{A2} = 3.82 \rightarrow 1.77$ кг/с соответственно. Указанные расходы компонентов обеспечили следующие коэффициенты избытка горючего: в зоне смесеобразования — близкий к стехиометрии $\phi_1 = 1.22 \rightarrow 0.92$, общий — $\phi_\Sigma = 0.49 \rightarrow 0.43$ (при $\alpha = 1.43 \rightarrow 1.13$). На фоторегистрограмме (2.85 мс вдоль каждой дорожки и 25 мс от дорожки к дорожке) также запечатлен процесс перестройки течения в камере при поступлении в нее добавочного воздуха через 40 мс после инициирования. После срабатывания инициатора в камере

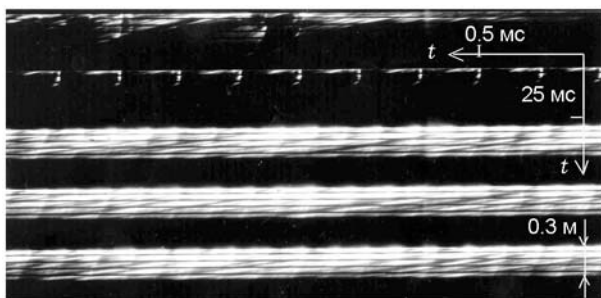


Рис. 2. Фоторегистрограмма процесса (фрагмент, $\approx 1/9$ часть по длине и $\approx 1/3$ по ширине): первая дорожка — горение после инициирования и возникновение тангенциальной неустойчивости, вторая — детонация смеси без добавки воздуха, $D = 1.57$ км/с и $n = 2$, третья и последующие дорожки — детонация с добавкой воздуха, $D = 1.39 \rightarrow 1.2$ км/с, $n = 4 \rightarrow 3$, $\alpha = 1.43 \rightarrow 1.15$

реализуется обычное горение, продолжающееся 25 мс, видимая часть которого простирается на расстояние ≈ 10 см по длине камеры. Затем наблюдается тангенциальная неустойчивость (первая дорожка), переходящая через 2 мс в устойчивую непрерывную спиновую детонацию из двух ($n = 2$) поперечных детонационных волн (ПДВ) (вторая дорожка), распространяющихся со скоростью $D = 1.56$ км/с ($D/D_{CJ} = 0.81$, где $D_{CJ} = 1.92$ км/с — скорость идеальной детонации Чепмена — Жуге для водородовоздушной смеси при стандартных условиях и $\phi_1 = 1.18$ [8]). При подаче добавочного воздуха ($\alpha = 1.43$) в камере начинается перестройка течения, количество волн возрастает до $n = 4$, а скорость детонации уменьшается — $D = 1.41$ км/с ($D/D_{CJ} = 0.73$). Высота фронта детонации h сокращается от 12 до 6 см (третья дорожка). Скорость втекающей в камеру газовой смеси на границе с продуктами детонации и вблизи фронта ПДВ снижается от сверхзвуковой ($v_{mix} = 640$ м/с) до дозвуковой ($v_{mix} = 210$ м/с). Через 33 мс от начала инициирования процесса ($\phi_1 = 0.95$, $\alpha = 1.17$) число волн уменьшается до $n = 3$, скорость — до $D = 1.2$ км/с ($D/D_{CJ} = 0.66$), высота фронта ПДВ увеличивается до $h = 10$ см. Характер течения в области смесеобразования остается дозвуковым, приближаясь на контактом разрыве с продуктами детонации к скорости звука ($v_{mix} = 340$ м/с).

На рис. 3,а для рассмотренного выше эксперимента представлена осциллограмма давлений в системе подачи компонентов (ресиверах и

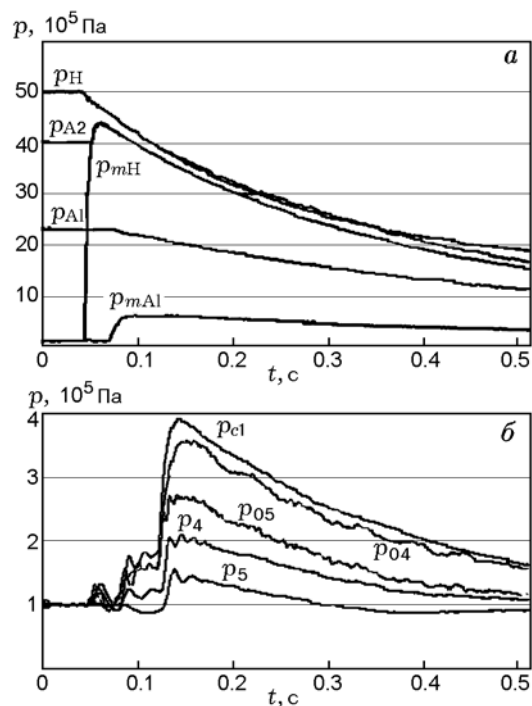


Рис. 3. Типичная осциллограмма изменения давлений в системе подачи компонентов смеси (а) и в камере (б):

$G_H = 0.106 \rightarrow 0.04$ кг/с, $G_{A1} = 2.8 \rightarrow 1.6$ кг/с, $G_{A2} = 3.82 \rightarrow 1.77$ кг/с, $\phi_1 = 1.18 \rightarrow 0.92$, $\phi_\Sigma = 0.49 \rightarrow 0.43$, $\alpha = 1.43 \rightarrow 1.13$

коллекторах), а на рис. 3,б — в камере и на выходе из нее. После инициирования и до момента подачи добавочного воздуха в камере устанавливается давление $p_{c2} = 1.6 \cdot 10^5$ Па. Значение p_{c1} на $0.2 \cdot 10^5$ Па ниже, так как датчик располагается в области струйного течения, а значение p_{c3} примерно на уровне p_{c2} . С увеличением скорости продуктов к выходу из камеры статическое давление в потоке монотонно уменьшается — $p_4 = 1.22 \cdot 10^5$ Па и $p_5 = 0.86 \cdot 10^5$ Па. Измеренное полное давление вследствие потерь также уменьшается — $p_{04} = 1.78 \cdot 10^5$ Па и $p_{05} = 1.6 \cdot 10^5$ Па. Сравнивая значения p_5 и p_{05} , видим, что на выходе из камеры реализуется критическое в среднем течение. Сравнение давлений p_{c1} и p_{mA1} (см. рис. 3,а и 3,б) также указывает на критическое в среднем истечение воздуха из коллектора в камеру.

При подаче добавочного воздуха давление в камере резко поднимается. При этом истечение смеси продуктов и воздуха из камеры остается критическим, а истечение воздуха из коллектора основной подачи становится докритическим, реагирующим на изменение условий в

камере. Однако на расходы воздуха в основной и дополнительной системах подачи, а также на подачу водорода изменение давления в камере не оказало никакого влияния (для воздуха расходы определялись минимальными проходными сечениями клапанов). Статическое давление в камере до места подачи добавочного воздуха выравнивалось на уровне $p_{c1} = p_{c2} = p_{c3} = 3.95 \cdot 10^5$ Па и по мере уменьшения общего расхода снизилось к концу эксперимента до $p_{c1} = p_{c2} = p_{c3} = 1.6 \cdot 10^5$ Па. Полные и статические давления ниже места подачи добавочного воздуха также возросли — $p_{04} = 3.55 \cdot 10^5$ Па и $p_4 = 2.1 \cdot 10^5$ Па, $p_{05} = 2.7 \cdot 10^5$ Па и $p_5 = 1.45 \cdot 10^5$ Па. К концу эксперимента их значения снизились соответственно до $p_{04} = 1.55 \cdot 10^5$ Па и $p_4 = 1.06 \cdot 10^5$ Па, $p_{05} = 1.16 \cdot 10^5$ Па и $p_5 = 0.9 \cdot 10^5$ Па, т. е. истечение из камеры в конце процесса приняло докритический характер.

Варьирование параметра α

Характер изменения давления в камере при всех значениях параметра α , задаваемых начальными условиями в различных экспериментах, сохранялся таким, как изображено на рис. 3, б. Начальная стадия развития непрерывного детонационного процесса (до подачи добавочного воздуха) оставалась неизменной, а давление в камере возрастало с увеличением α . Устойчивый режим непрерывной спиновой детонации реализовывался при $\alpha < 2.65$. При $2.65 < \alpha < 2.8$ наблюдались нестабильные ПДВ на фоне обычного горения, а при $\alpha > 2.8$ — обычное горение. На пределе существования детонационного режима реализовывалось пять ПДВ, движущихся со скоростью $D \approx 1.0$ км/с. Высота фронта ПДВ была неявно выражена и составляла $h \approx 3 \div 4$ см, а скорость смеси перед волной — $v_{mix} \approx 100$ м/с.

Добавка воздуха в зону смесеобразования

При последовательном обеднении смеси горючим в области смесеобразования путем увеличения расхода воздуха в основной системе подачи и без дополнительной подачи воздуха ($p_{H0} = 75 \cdot 10^5$ Па = const, $\phi_1 = 1.3 \div 0.5$, $G_{A1} = 8.6 \div 3.3$ кг/с, $\alpha = 0$) давление в камере повышалось. По мере уменьшения ϕ_1 скорость непрерывной спиновой детонации снижалась от 1.54 до 1.17 км/с ($n = 3$) вплоть до

неустойчивых режимов при значении $\phi_1 = 0.5$, которое для $p_{c2} = 2.5 \cdot 10^5$ Па и данной камеры можно считать нижним концентрационным пределом для детонации исследуемой смеси. Повышенные расходы воздуха использовались также для того, чтобы на большей части процесса или даже всё его протяжении иметь сверхкритический перепад давления на выходе из камеры и избавиться от влияния внешней среды на параметры истечения.

Распределение указанного расхода воздуха в предельном режиме на две части: основную подачу ($\phi_1 = 1.05 \div 0.8$) и дополнительную ($\alpha = 0.84 \div 0.58$) при $\phi_\Sigma = 0.6 \div 0.5$ — привело к стабилизации детонационного процесса. Причем скорость детонации и число волн практически не изменились: до и в начале подмешивания $D \approx 1.4$ км/с, $n = 3$, а к концу опыта скорость непрерывно вращающейся детонации монотонно снижалась с уменьшением ϕ_1 без изменения количества волн. В обеих постановках осциллограммы полного давления p_{05} на выходе из камеры совпали с точностью до небольших различий полных расходов воздуха. Результаты последних опытов позволили увеличить дополнительную подачу воздуха и реализовать устойчивый детонационный режим с ПДВ ($D = 1.23 \rightarrow 1.06$ км/с и $n = 3$) в диапазонах параметров $\alpha = 1.45 \div 1.18$, $\phi_1 = 0.68 \div 0.57$ и $\phi_\Sigma = 0.27 \div 0.26$. При более низких значениях этих параметров ($1.15 < \alpha < 1.18$, $0.54 < \phi_1 < 0.58$ и $0.25 < \phi_\Sigma < 0.26$) наблюдались нестабильные ПДВ, а при $\phi_\Sigma < 0.25$ реализовывалось обычное турбулентное горение.

Варьирование параметров L_{A2} и L_c

Установлено, что изменение расстояния L_{A2} начинало заметно влиять на параметры непрерывной спиновой детонации после того, как фронт ПДВ шириной h перекрывал место дополнительной подачи ($L_{A2} < h$) или находился в непосредственной близости от него. Например, при $\alpha = 1.1 \div 0.92$ перемещение места подачи добавочного воздуха на расстояние $L_{A2} = 15$ см не оказывало влияния на детонацию ($n = 3$, $h \approx 8$ см) и параметры истечения продуктов. Оно становилось заметным при $L_{A2} = 9$ см и выражалось в нестабильности ПДВ при $\alpha > 0.97$ и в понижении полного давления на выходе из камеры p_{05} на $10 \div 20$ % (большее расхождение в конце опыта). При $\alpha > 1.45$ в камере реализовывалось обычное горение. Уменьшение длины камеры

до $L_c = 21.5$ см при $L_{A2} = 15$ см не отразилось на детонации и процессе истечения продуктов. В опытах, проведенных при $\alpha = 1.1 \div 0.92$, давление полного торможения потока на выходе из камер p_{05} совпадало на протяжении всего процесса с ранее рассмотренным вариантом ($L_c = 87$ см и $L_{A2} = 27$ см). Отметим, что без дополнительной подачи воздуха даже в камере длиной $L_c = 17.5$ см ($\alpha = 0$) осуществлялся очень устойчивый детонационный режим ($D = 1.48 \rightarrow 1.37$ км/с, $n = 2$ при $\phi_1 = 1.2 \rightarrow 0.94$). В этом случае ширина фронта ПДВ была в 1.5 раза меньше длины камеры. Для всех размеров кольцевого канала при заданных расходах компонентов смеси и $\phi_1 \approx 1$ наблюдались режимы с $n > 1$.

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Подвод дополнительной массы газа в поток равносителен сужению проходного сечения трубок тока, а устройство, производящее такое воздействие, называется «полумассовым» соплом [9]. Представляет интерес исследовать влияние добавки воздуха в продукты детонации на удельный импульс камеры сгорания. Сила тяги определяется формулой [10]

$$F = \int_S [p + \rho v^2 - p_a] dS = (p_{05} - p_a) S_c,$$

где ρ — плотность, p_a — противодавление, v — скорость, dS — площадь элементарной трубки тока, $S_c = \pi \Delta (d_c - \Delta)$ — площадь поперечного сечения кольцевой цилиндрической камеры. Измеряя давление торможения p_{05} на выходе из камеры, можно определить силу тяги F и удельный импульс либо относительно расхода всей массы газа ($G_\Sigma = G_{A1} + G_{A2} + G_H$): $I_{sp\Sigma} = F/G_\Sigma = (p_{05} - p_a) S_c / G_\Sigma$, либо относительно расхода одного горючего — $I_{spH} = (p_{05} - p_a) S_c / G_H$. Величина импульса I_{spH} является определяющей, поскольку характеризует экономичность двигателя [6].

На рис. 4 для камеры длиной $L_c = 87$ см ($L_{A2} = 27$ см) представлены зависимости удельных импульсов $I_{sp\Sigma}$ и I_{spH} от количества подмешивания воздуха α , отнесенные к значениям этих величин $I_{sp\Sigma 0}$ и $I_{spH 0}$ в случае без подмешивания. Зависимости соответствуют началу процесса, когда истечение из камеры сверхкритическое ($p_{05}/p_5 > 1.84$) при

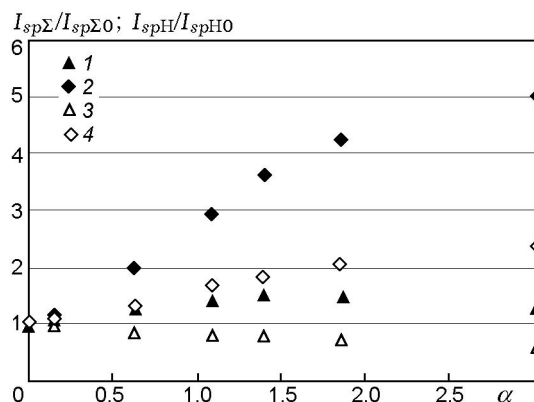


Рис. 4. Изменение удельных импульсов для расхода компонентов смеси $I_{sp\Sigma}/I_{sp\Sigma 0}$ (1) и расхода водорода $I_{spH}/I_{spH 0}$ (2) при истечении продуктов в атмосферу в зависимости от добавки воздуха (α):

$I_{sp\Sigma 0}$ и $I_{spH 0}$ — соответствующие удельные импульсы без добавки воздуха ($\alpha = 0$); $\phi_1 = 1.15$, $I_{sp\Sigma 0} = 0.386 \cdot 10^3$ м/с, $I_{spH 0} = 12 \cdot 10^3$ м/с; значки 3, 4 — возможные значения $I_{sp\Sigma}$ и I_{spH} при истечении продуктов в вакуум, $I_{sp\Sigma 0} = 1.16 \cdot 10^3$ м/с и $I_{spH 0} = 36 \cdot 10^3$ м/с

$\phi_1 = 1.15$. С ростом параметра α удельный импульс $I_{sp\Sigma}$ сначала увеличивается, проходит через максимум, а затем начинает уменьшаться. Значения удельного импульса I_{spH} монотонно возрастают. На этом же рисунке для сравнения приведены значения удельных импульсов, которые могли бы реализоваться при истечении продуктов в пустоту ($p_a = 0$). Для характеристики эффективности двигателя они более предпочтительны, так как не требуют учета влияния высоты полета летательного аппарата [9]. При сверхкритическом истечении продуктов такое сравнение возможно, так как внешние условия не влияют на процессы в камере. Видно, что с ростом параметра α рассчитанный при истечении продуктов в пустоту удельный импульс $I_{sp\Sigma}$ монотонно убывает, а I_{spH} увеличивается. Необходимо отметить, что в последнем случае текущие значения $I_{sp\Sigma}$ и I_{spH} нормировались по их начальным значениям, втрое превышающим значения при истечении продуктов в атмосферу. Поэтому двойное различие величин $I_{sp\Sigma}$ и I_{spH} при больших значениях α указывает на менее эффективное влияние подмешивания воздуха в условиях противодавления.

С увеличением степени подмешивания α давление в области фронта ПДВ и давление

торможения на выходе из камеры (см. рис. 3, б) возрастают, причем последнее на границе области существования детонации ($\alpha \approx 2.6$) достигает максимума. С формированием полумассового сопла течение во всей области смесеобразования становится дозвуковым, причем скорость потока уменьшается до значений $v_{mix} = 200 \div 100$ м/с, поэтому динамическая составляющая полного давления мала и измеренное статическое давление с точностью до ошибки измерения приближается к полному давлению: $p_{c1} = p_{c2} = p_{c3} \approx p_{c0}$. Повышение давления в зоне смесеобразования снижает критическую по детонации высоту фронта ПДВ. Однако с уменьшением скорости смесевых компонентов снижается качество их перемешивания, возрастает степень выгорания образующейся смеси по механизму обычного горения, уменьшается скорость ПДВ (рис. 5), а количество волн возрастает от $n = 2$ или 3 ($\alpha = 0$) до $n = 4$ или 5 ($\alpha \rightarrow 2.6$). Значение $\alpha \approx 2.6$, по-видимому, и является граничным в кольцевой цилиндрической камере для существования весьма слабой детонации при $\phi_1 \approx 1$, что соответствует $\phi_\Sigma \approx 0.28$. Предельное значение ϕ_1 ($\alpha = 0$) для основной системы подачи, полученное ранее [4], равнялась 0.63 ($p_{c3} \approx 1 \cdot 10^5$ Па). В данной работе при повышенных расходах ($G_{A1} = 5.1$ кг/с, $p_{c3} \approx 2.8 \cdot 10^5$ Па) удалось снизить коэффициент избытка горючего до $\phi_1 = 0.5$ ($p_{c3} \approx 2.2 \cdot 10^5$ Па), что связано с уменьшением критического размера слоя смеси для непрерывной спиновой детонации.

В таблице представлены данные по удельному расходу водорода $g_H = G_H/F$ при $\phi_1 = 1.52 \div 0.5$ в случаях без добавки и с добавкой воздуха. Из всего массива данных выбраны те значения параметров, которые соответствова-

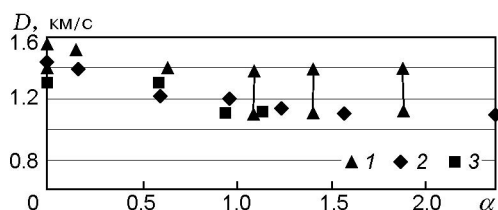


Рис. 5. Зависимости скорости непрерывной спиновой детонации водородовоздушных смесей от добавки воздуха в продукты:

1 — $\phi_1 = 1.15$, 2 — $\phi_1 = 1$, 3 — $\phi_1 = 0.93$; разные значения D при одинаковых α соответствуют смене числа волн

Зависимость удельного расхода топлива (g_H) от коэффициента избытка горючего в основной системе подачи (ϕ_1) и добавки воздуха в продукты (α)

α	ϕ_1	g_H , кг/(ч·Н)
0	1.52	0.184
	1.13	0.18
	1.05	0.168
	0.89	0.16
	0.84	0.14
	0.5	0.12
0.62	0.83	0.126
1.1	0.53	0.08

ли давлению на выходе камеры $p_{05} = 2 \cdot 10^5$ Па. Отметим, что при $\alpha = 0$ уменьшение ϕ_1 в 3 раза приводит к уменьшению g_H в 1.5 раза, а дополнительная подача воздуха ($\alpha = 1.1$) на пределе существования детонации ($\phi_1 \approx 0.53$) уменьшает g_H еще в 1.5 раза (до 0.08 кг/(ч·Н)). Однако это значение g_H не является наименьшим. В опыте, данные для которого приведены в последнем столбце таблицы (а также и других опытов), удельный расход водорода уменьшается с повышением давления торможения. В начале процесса при $p_{05} = 4.6 \cdot 10^5$ Па, $\phi_1 = 0.65$, $\alpha = 1.4$ ($\phi_\Sigma = 0.27$) на данной установке было получено его минимальное значение — $g_H = 0.04$ кг/(ч·Н).

Расширение области существования непрерывной спиновой детонации топливно-воздушной смеси

Данные проведенных экспериментов позволяют расширить известные [4] границы области существования непрерывной спиновой детонации водородовоздушной смеси в координатах ϕ_Σ , g_Σ (рис. 6). Здесь $g_\Sigma = G_\Sigma/S_c$ — удельный расход смеси, темные значки соответствуют режимам детонации без добавки воздуха в продукты ($\alpha = 0$, $\phi_\Sigma = \phi_1$), светлые — с добавкой. В опытах без добавки воздуха детонационные режимы осуществлены при высоких значениях ϕ_Σ (до $\phi_\Sigma = \phi_1 \approx 4.4$), с добавкой — при высоких значениях g_Σ (до $g_\Sigma = 560$ кг/(с·м²)) и низких значениях ϕ_Σ ($\phi_\Sigma = 0.28$, $\phi_1 = 1.2$, $\alpha = 2.6$). Отметим, что избыток водорода в указанных пределах способствует развитию устойчивой непрерывной спиновой детонации.

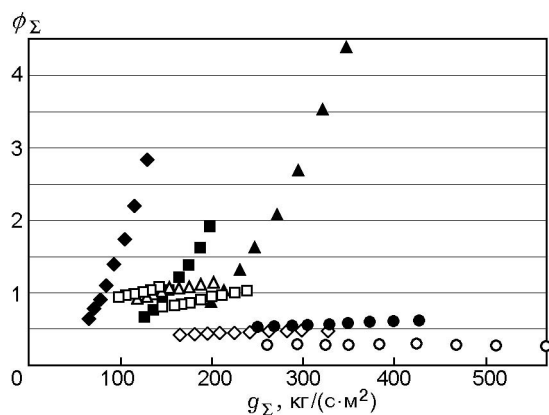


Рис. 6. Исследованная область реализации режима непрерывной спиновой детонации водородовоздушных смесей:

темные значки — режимы детонации без добавки воздуха в продукты ($\alpha = 0$, $\phi_\Sigma = \phi_1$), светлые — с добавкой

Потери полного давления

Проведенные опыты показали достаточно высокие потери полного давления от сечения ввода добавочного воздуха до выхода из камеры. Например, для варианта, приведенного на рис. 3, б (см. кривые p_{04} и p_{05}), в установившемся детонационном режиме до начала дополнительной подачи воздуха потери полного давления $\xi = \Delta p/p_{04} = (p_{04} - p_{05})/p_{04}$ на участке камеры длиной 55 см между датчиками, измеряющими давления p_{04} и p_{05} , составляют $\approx 10\%$. Они складываются из энтропийных потерь, связанных с наличием вращающейся косой ударной волны (шлейфа) и потерь на трение газа о стенки. После подачи добавочного воздуха появляются потери на перемешивание и подвод тепла Q к движущемуся холодному газу с температурой T ($dS = dQ/T$). Поэтому величина ξ возрастает до 25% и сохраняется примерно на этом уровне при звуковом истечении со среза камеры. При дозвуковом истечении продуктов из камеры ($p_{05}/p_5 < 1.84$) потери возрастают до 30%. По данным опытов с увеличением значения α от 1.43 до 2.6 потери незначительно увеличиваются — до 2% при предельной величине α и звуковом истечении. Отметим, что в короткой камере $L_c = 21.5$ см ($L_{A2} = 15$ см) при тех же параметрах подачи относительные потери полного давления ξ между датчиками, расположенными на расстоянии 5 см друг от друга, практически не изменились. Осциллограммы полного давления на

выходе из камеры p_{05} при тех же расходах компонентов для короткой и длинной камер также оказались близкими. Поэтому на практике целесообразно использовать короткие детонационные камеры сгорания длиной $L_c \approx (1.5 \div 2)h$.

Общие потери полного давления в камере детонационного сгорания превышают указанные выше, так как к рассмотренным потерям необходимо добавить потери в области вращения ПДВ и верхней части примыкающего к ней шлейфа. Здесь можно привести только оценку снизу, определенную по величине статического давления, регистрируемого датчиками на расстоянии 1.5, 7 и 10 см от торца. Корректное измерение полного давления трубкой Пито в области вращения ПДВ оказалось невозможным ввиду высокого значения и постоянного изменения направления тангенциальной составляющей вектора скорости потока. Поскольку с увеличением параметра α динамическая составляющая давления потока в области ПДВ уменьшается, то измеренные статические давления приближаются к полному давлению и точность оценки увеличивается. Например, в опыте, результаты которого приведены на рис. 3, б, потери полного давления могут составлять $\xi \approx 30\%$. Эта оценка соответствует давлению p_3 , измеренному на расстоянии 10 см от торца, т. е. в области нижнего края ПДВ. Сравнение с давлениями p_1 и p_2 соответственно на расстоянии 1.5 и 7 см от торца показывает, что они практически идентичны. То есть полное давление отличается от статического на величину динамической составляющей, значение которой по оценкам не превышает 5% от полного давления. Таким образом, в данном примере потери полного давления по всей длине камеры составляют около 35%. Для непрерывной детонации до начала добавления воздуха ($\alpha = 0$) оценки затруднительны ввиду большой динамической составляющей давления. Разумеется, полное давление не может превышать максимально возможное, которое определяется из законов сохранения [11]: $p_{0c} = D_{CJ} g_\Sigma / \gamma$. Подставляя в это выражение $D_{CJ} = 1.92$ км/с для $\phi_1 = 1.18$ [8] и $\gamma = 1.24$ [12] при $g_\Sigma = 137$ кг/(с·м²), получим оценку полного давления в начале камеры — $p_{0c} = 2.12 \cdot 10^5$ Па. Сравнивая эту величину с полным давлением на выходе из камеры ($p_{05} = 1.6 \cdot 10^5$ Па), находим потери полного давления для «чистых» продуктов — 24%. Таким образом, при детонации и исте-

чении «чистых» продуктов в результате энтропийных потерь к выходу из камеры длиной $L_c = 87$ см теряется около четверти полного давления продуктов.

Возникает вопрос, где выгоднее вводить добавочный воздух — через основную подачу в области смесеобразования или в поток продуктов.

Количество добавляемого в основной поток воздуха ограничено пределом существования детонации по концентрациям ($\phi_1 = 0.6 \div 0.5$). Если это предельное количество воздуха распределить на обеспечение стехиометрического соотношения с горючим ($\phi_1 = 1$), а остальное — на подачу в продукты, то полное давление продуктов на выходе из камеры практически не изменится. Произойдет лишь перераспределение давлений внутри камеры. Так, например, в наших опытах полное давление p_{04} во втором случае было на 6 % выше, чем в первом. В условиях повышенного давления в камере и увеличения продолжительности пребывания топлива в области смесеобразования обеднение смеси в системе основной подачи приводит к уменьшению степени выгорания топлива по механизму обычного горения и позволяет снизить нижний концентрационный предел по непрерывной спиновой детонации (ϕ_1). Про-smатривается следующее направление снижения удельного расхода топлива: установка ϕ_1 вблизи нижнего предела и повышение α до верхнего предела, а при сверхкритическом перепаде давлений на срезе камеры — расширение потока с помощью сопла. В наших опытах сопло отсутствовало, поэтому еще имеются резервы по уменьшению полученных минимальных значений g_H .

Влияние добавки жидкого горючего (керосина) на параметры ПДВ в топливно-кислородной смеси рассмотрено в работе [13]. Было выяснено, что увеличение добавки керосина до $\phi_\Sigma = 10$ в поток продуктов ниже фронта ПДВ, распространяющейся по стехиометрическому составу смеси, лишь незначительно снижало скорость детонации, в то время как подача горючего в зону смесеобразования полностью прекращала детонацию при $\phi_1 > 3$. Значение $\phi_\Sigma = 10$ не является предельным, поскольку расход горючего меньше расхода окислителя. Не исключено, что исходя из какой-либо экономической или технологической целесообразности возможна будет дополнительная подача горючего и в ВРД, в том числе и керо-

сина, в более широких пределах по ϕ_Σ .

ВЫВОДЫ

- В камере кольцевой цилиндрической геометрии осуществлены режимы непрерывной спиновой детонации водородовоздушной смеси с добавками воздуха в продукты детонации, превышающими расход воздуха в основной системе подачи до 2.6 раза, что соответствует коэффициенту общего избытка горючего 0.28. Выяснено, что для устойчивой детонации добавочный воздух следует подавать ниже области распространения фронта поперечной детонационной волны.

- При дополнительной подаче воздуха в продукты повышается давление в камере и интенсифицируется обычное горение, что приводит к увеличению числа детонационных волн и их ослаблению.

- Обеднение смеси горючим в зоне смесеобразования, а также добавка воздуха в продукты детонации увеличивают полный импульс и уменьшают удельный расход топлива, минимальная достигнутая величина которого составила 0.04 кг/(ч·Н). При этом расширяется область существования непрерывной спиновой детонации: снижается нижний предел по концентрации горючего, а также повышаются удельные расходы смесевых компонентов в камере.

- Выяснено, что потери полного давления в камере для разных соотношений компонентов смеси в зонах смесеобразования и добавки воздуха в продукты связаны в основном с потерями в детонационных и ударных волнах, а также за счет смешения и теплообмена горячих продуктов и добавочного воздуха, поступающего в камеру при низкой температуре. Максимальные потери полного давления к выходу из камеры могут достигать до 1/3, а в опытах без добавки воздуха составлять около 1/4 от начального полного давления.

- Для уменьшения массы и размеров двигателя или энергетической установки без снижения качества непрерывного детонационного сжигания топлива целесообразно использовать короткую камеру сгорания, длина которой примерно вдвое превышает высоту поперечного детонационного фронта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective // Progress in Energy and Combust. Sci. — 2004. — V. 30. — P. 545–672.
2. Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F. Continuous spin detonations // J. Propulsion and Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1204–1216.
3. 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.
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. Теория авиационных двигателей. Ч. II. Теория реактивных двигателей / С. И. Востриков, Л. Н. Зуев, В. И. Кузнецов, М. А. Махнутин, А. Н. Неспела, В. А. Пелищенко, А. К. Токмаков, А. М. Филин. — М.: Военное изд-во Министерства обороны СССР, 1960.
6. Казанджан П. К., Тихонов Н. Д., Янко А. К. Теория авиационных двигателей. — М.: Машиностроение, 1983.
7. Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф. Исследование непрерывной спиновой детонации водородокислородных смесей. 3. Методики измерения параметров потока и структура течения в камерах сгорания различной геометрии // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 87–97.
8. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1968.
9. Феодосьев В. И. Основы техники ракетного полета. — М.: Наука, 1979.
10. Зуев В. С., Макаров В. С. Теория прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей. — М.: Машиностроение, 1971.
11. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
12. Николаев Ю. А., Топчиян М. Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 3. — С. 393–404.
13. Bykovskii F. A., Mitrofanov V. V. A Continuous spin detonation in liquid fuel sprays // Control of Detonation Processes / G. Roy, S. Frolov, D. Netzer, A. Borisov (Eds). — Moscow: Elex-KM Publishers, 2000. — P. 209–211.

*Поступила в редакцию 30/I 2009 г.,
в окончательном варианте — 31/III 2009 г.*