

ИНИЦИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ТОПЛИВОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПРОТОЧНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ

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

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

Исследовалось инициирование детонации в потоке топливовоздушной смеси, формируемой в камере кольцевой цилиндрической геометрии диаметром 306 мм. В качестве источника инициирования использовалась детонационная волна, входящая в кольцевой канал из вихревой камеры плоскорадиальной геометрии, а также струя продуктов или тепловой импульс малой мощности. Показано, что непрерывную спиновую детонацию (НСД) водородовоздушных смесей можно осуществить всеми указанными способами. Ее формирование сопровождается переходным процессом длительностью до 10 мс, связанным с нарушением подачи компонентов смеси (инициирование детонационной волной) или со временем развития тангенциальной неустойчивости в НСД (струйное инициирование продуктами или искрой). Реализована передача детонации в поток химически малоактивных топливовоздушных смесей (пропано-, метано-, керосино- и бензиновоздушной) инициирующей детонационной волной, сформированной в течение долей миллисекунды импульсом малой энергии или в результате самовоспламенения водородовоздушной смеси в вихревой плоскорадиальной камере. Установлено, что для организации НСД этих смесей необходимы камеры большего, чем 306 мм, диаметра. Показана возможность реализации НСД химически малоактивных керосино- и бензиновоздушных смесей путем обогащения воздуха кислородом перед входом в камеру сгорания.

Ключевые слова: камера сгорания, детонационная волна, непрерывная спиновая детонация, топливовоздушная смесь, инициирование, переход горения в детонацию.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос инициирования детонации топливовоздушных смесей имеет принципиальное значение для детонационного сжигания в практических приложениях, в том числе в детонационных двигателях [1, 2]. Помимо прямого инициирования детонации, в обзоре [3] приведены схемы инициирования, ускоряющие процесс перехода горения в детонацию: установка профилированных отражающих поверхностей, формирование формы инициирующего заряда, создание искусственной турбулизации потока с помощью препятствий, инициирование в сверхзвуковом потоке смеси. В работах [4–8] показано, что благодаря формированию особого рода вихревого течения, в том числе дозвукового [9], энергию инициирования детонации водородовоздушной смеси можно снизить до 0.1 Дж и даже добиться ее самовоспламенения с длительностью переходного режима к детонации

в десятые доли миллисекунды. В зависимости от геометрии камеры сгорания и ее назначения первичная детонационная волна была использована для развития в камере непрерывной спиновой детонации (НСД). Эта волна может также обеспечить передачу детонации другой горючей смеси, находящейся вне камеры. Цель данной работы — осуществить инициирование как пульсирующей, так и непрерывной спиновой детонации потока топливовоздушной смеси, создаваемого в проточной кольцевой цилиндрической камере детонационной волной, формируемой в вихревой плоскорадиальной камере, а также добавкой кислорода в воздух на входе в камеру.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

Схема экспериментального устройства изображена на рис. 1. Устройство состояло из кольцевой цилиндрической камеры проточного типа 1 и плоскорадиальной вихревой камеры (инициатора) 2. Размеры камеры 1 следующие: диаметр $d_{c1} = 306$ мм, длина $L_{c1} = 520$ мм и ширина канала $\Delta_{c1} = 23$ мм. Размеры камеры 2: диаметр $d_{c2} = 204$ мм,

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по программе Президиума РАН № 26.3 и гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (№ 247.2012.1).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., 2014.

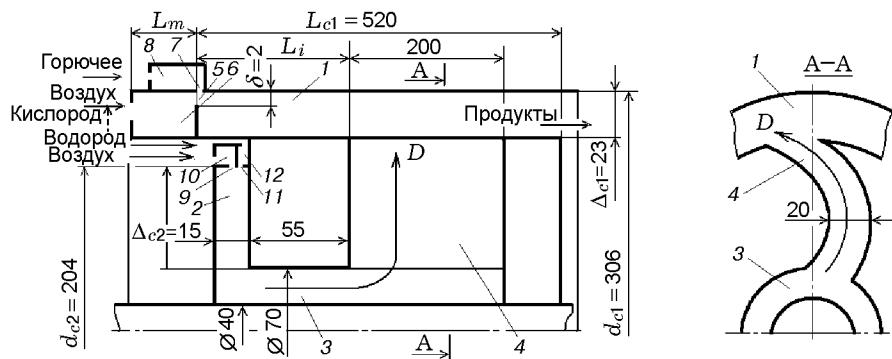


Рис. 1. Схема кольцевой цилиндрической камеры 1 с инициирующим устройством, включающим вихревую плоскорадиальную камеру 2

расстояние между плоскими стенками $\Delta_{c2} = 15$ мм, длина выходного коаксиального канала 3, образованного наружной стенкой диаметром 70 мм и валом диаметром 40 мм, составляла 255 мм. Инициатор 2 соединялся с камерой 1 коаксиальным каналом 3 и каналом направленного действия детонационной волны 4 длиной 200 мм с расстоянием между изогнутыми стенками 20 мм. Конструкция камеры 1 полностью соответствует камере [10], в которой осуществлялись устойчивые режимы НСД водородовоздушной смеси, а конструкция камеры 2 — камере, в которой реализовывалось быстрое инициирование детонации после самовоспламенения или под действием теплового импульса малой энергии [4–7].

Воздух в камеру 1 поступал сплошным потоком через кольцевой зазор 5 из коллектора 6, горючее — через равномерно расположенные по окружности камеры отверстия форсунки 7 из коллектора 8. Воздух и горючее перемешивались и создавали детонационноспособный поток смеси. Величина зазора 5 для подачи воздуха составляла 2 мм, а размеры отверстий форсунок горючего (F1–F3) приведены в табл. 1.

Воздух в инициатор 2 поступал через тангенциально направленные каналы 9 из коллектора 10, водород — через каналы 11 из коллектора 12. Каналы инициатора для воздуха (A1) и горючего (F4) расположены равномерно по окружности, их размеры указаны в табл. 2.

Горючее подавалось в основную камеру 1: газы (водород, пропан, метан) — из ресиверов, жидкости (бензин, керосин) — вытеснением из расходомера воздухом. Для жидких горючих воздух иногда обогащался кислородом.

Таблица 1
Форсунки горючего для камеры 1

Форсунка	Размеры сечения отверстий, мм	Количество отверстий	Площадь полного сечения отверстий, мм^2
F1	1.0 × 1.0	200	200
F2	0.5 × 0.4	200	40
F3	0.2 × 0.2	200	8

Таблица 2
Форсунки горючего и воздуха для камеры 2

Форсунка	Размеры сечения отверстий, мм	Количество отверстий	Площадь полного сечения отверстий, мм^2
F4	0.25 × 0.3	180	13.5
A1	1.0 × 4.0	50	200

В инициаторе 2 применялся только водород, а в качестве окислителя — воздух.

При заданных параметрах подачи обеспечивались следующие начальные (удельные) расходы в камеру 1: воздуха — $G_{a10} = 2.8 \div 12 \text{ кг/с}$ ($g_{a10} = 140 \div 590 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}$), водорода — $G_{f10} = 0.095 \div 0.067 \text{ кг/с}$ ($g_{f10} = 5 \div 3 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}$), пропана — $G_{f10} = 0.2 \text{ кг/с}$ ($g_{f0} = 10 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}$), метана — $G_{f10} = 0.44 \text{ кг/с}$ ($g_{f10} = 22 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}$), бензина и керосина — $G_{f10} \approx 0.8 \text{ кг/с}$ ($g_{f0} \approx 40 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}$). Здесь $g_i = G_i / S_{c1}$, где i — индекс смесе-

вого компонента, $S_{c1} = 204.5 \text{ см}^2$ — площадь кольцевого сечения камеры 1. В опытах с добавкой кислорода в воздух начальные абсолютные и удельные расходы кислорода составляли $G_{ox0} = 1.4 \div 0.55 \text{ кг/с}$ и $g_{ox0} = 70 \div 30 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2)$.

В течение опыта, который продолжался около 0.4 с, расходы уменьшались: воздуха — в 1.8 раза, водорода — в $2.4 \div 6$ раз, пропана — в 1.4 раза, метана — в 2.5 раза, бензина и керосина — на несколько процентов. Начальные расходы в камеру 2 составляли: воздуха — $G_{a20} = 2.5 \text{ кг/с}$, водорода — $G_{f20} = 0.044 \text{ кг/с}$. К концу опыта расходы уменьшались: воздуха — в 10 раз, водорода — в 7.5 раза. Возбуждение детонации в инициаторе осуществлялось пережиганием проволочки с помощью разряда энергией около 5 Дж. Истечение продуктов происходило в емкость объемом 60 м³ при давлении $p_a = 10^5 \text{ Па}$.

Фоторегистрация процесса в камере 1 проводилась фоторегистратором с падающим барабаном [11, 12] через продольные окна из оргстекла, находящиеся вдоль наружной стенки камеры (на рис. 1 не показаны). Длина одного окна составляла 45 мм, а непрозрачного промежутка между окнами — 15 мм. Поэтому на фоторегистограммах сумма этих расстояний (60 мм) служила масштабом явлений в камере в осевом направлении. Окна находились на противоположной стороне от выхода канала 4. Для подсветки процесса выше первого окна (около кольцевого зазора подачи воздуха 5) в камеру впрыскивалась струйка ацетилена и коаксиально с ней струйка кислорода. Фотопленка вращалась в направлении, перпендикулярном длинной стороне окна. Поэтому светящиеся объекты, движущиеся вдоль окна, фиксировались на развертке (x, t -диаграммы), а в тангенциальном направлении — в натуральную величину. Давления в ресиверах, коллекторах воздуха 6 ($p_{m,a}$) и горючего 8 ($p_{m,f}$), давление в камере (p_{c1}, p_{c2}, p_{c3}) на расстоянии 1.5, 10 и 52 см от начала кольцевого канала камеры 1, а также ход поршня расходомера жидкого горючего и момент пережигания проволочки регистрировались с помощью компьютерной системы. Методики вычисления расходов газов и жидкого горючего приведены в работе [12].

При инициировании детонации керосино- и бензиновоздушной смесей в камере 1 в ряде опытов камера 2 исключалась из работы экспериментального устройства, а в тракт подачи

окислителя перед поступлением воздуха подавался чистый кислород (см. рис. 1). Сначала воспламенялась топливокислородная смесь пережиганием полоски алюминиевой фольги разрядом с энергией около 5 Дж, затем подавался воздух, который в трубопроводе смешивался с кислородом. Образующаяся смесь направлялась в коллектор 6, а из него в камеру 1. Далее процесс протекал при незначительном уменьшении концентрации кислорода в окислителе и постоянном расходе жидкого горючего.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Инициирование детонации в потоке водородовоздушной смеси

Отработка данного экспериментального устройства проводилась со смесью водород — воздух, поскольку НСД указанной смеси в камере кольцевой цилиндрической геометрии [10] и инициирование детонации в камере плоскорадиальной геометрии [4–7] достаточно хорошо изучены. В камере 1 устанавливалась форсунка F2, а в камере 2 — форсунки A1 и F4. Для определения влияния инициирующей детонационной волны на эффективность инициирования НСД водородовоздушной смеси в камере 1 эксперименты проводили при значениях параметра $L_i = 2, 15.5$ и 27 см (L_i — расстояние от начала камеры до края канала 4, см. рис. 1).

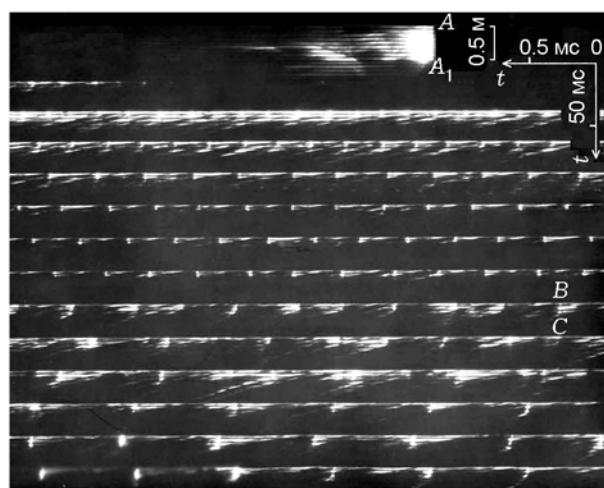


Рис. 2. Фрагмент фоторегистограммы инициирования НСД водородовоздушной смеси в кольцевой цилиндрической камере 1 детонационной волной, сформированной в плоскорадиальной камере 2

На рис. 2 приведен фрагмент фоторегистрограммы опыта с параметром $L_i = 15.5$ см, иллюстрирующий начало переходного процесса формирования НСД в камере 1 и ее дальнейшее развитие. Первой в смеси, заполнившей весь объем камеры, появилась детонационная волна напротив окон (AA_1) и распространилась в направлении, заданном каналом 4 (см. рис. 1). От канала 4 она совершила половину оборота по окружности камеры. Причем к моменту подхода к окнам детонационная волна дошла до переднего торца камеры и сформировался фронт, параллельный образующей цилиндрической поверхности камеры: все точки детонационного фронта вышли к продольным окнам одновременно. Затем через 0.1 мс появилась размытая ударная волна, представляющая собой выродившуюся детонационную волну, которая отошла от канала 4 в противоположном направлении. После нескольких пробегов этих волн по окружности камеры появилась тангенциальная неустойчивость в виде звуковых возмущений на фоне горения поступающей в камеру смеси. Неустойчивость развивалась в НСД достаточно длительный отрезок времени — около 10 мс.

Сформировавшаяся НСД наблюдалась всё время фоторегистрации (≈ 330 мс), при этом количество поперечных (спиновых) детонационных волн (ПДВ) по окружности камеры изменялось от четырех ($n = 4$) до одной ($n = 1$). Поскольку высота фронта детонации BC составляла $h \approx 6, 8$ или 12 см для 4, 3 или 2 ПДВ соответственно, то они вращались выше (по потоку) канала 4. Поэтому продукты горения из камеры 2 не попадали в область вращения фронта ПДВ. При переходе НСД в одноволновый режим с $h \approx 24$ см нижняя часть фронта ПДВ проходила через канал 4. Однако этот режим устанавливался через 250 мс от начала инициирования, когда расход продуктов из камеры 2 не превышал $1/3$ расхода из камеры 1 и заметно не влиял на ПДВ.

Полученные в этом эксперименте осциллограммы давления в ресиверах и коллекторах приведены на рис. 3, а в камере 1 — на рис. 3, б. При открытии электромагнитных клапанов начинается переходный процесс истечения, связанный с заполнением коллекторов и камеры 1 компонентами смеси. После прохождения максимума давления в коллекторах обоих компонентов истечение из системы подачи можно условно считать установленвшимся,

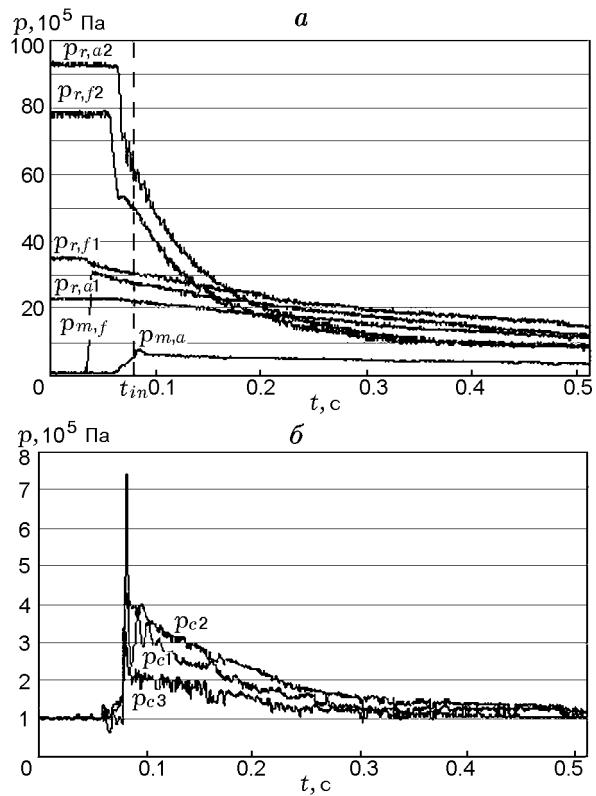


Рис. 3. Типичные осциллограммы давления в системе подачи (а) и в кольцевой цилиндрической камере (б) для водородовоздушной смеси

так как расходы в системе подачи и в камере уменьшаются, но их значения изменяются не так быстро, как в переходном режиме.

Момент инициирования t_{in} (момент пережигания проволочки) показан на рис. 3, а. За время около 0.2 мс сформировавшаяся в камере 2 детонационная волна выходит в камеру 1, в результате чего давление в ней увеличивается скачком (см. рис. 3, б). Удельные расходы компонентов в момент инициирования детонации в камере 1 были следующими: воздух — $g_{a1} = 100 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, водород — $g_{f1} = 3.0 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, коэффициент избытка горючего $\phi_1 \approx 1$. Абсолютные расходы газов в камере 2 составляли: $G_{a2} = 2.53 \text{ кг}/\text{с}$ и $G_{f2} = 0.041 \text{ кг}/\text{с}$, коэффициент избытка горючего $\phi_2 = 0.56$. Датчик, находящийся на расстоянии 10 см от щели, зарегистрировал максимальное статическое давление $p_{c2} \approx 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$, минимальное давление $p_{c3} \approx 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ зарегистрировано на выходе из камеры.

В серии опытов с $L_i = 2$ см инициирование детонации и распространение начальных детонационных и ударных волн в камере 1 про-

исходило при том же соотношении компонентов, что и в рассмотренном выше случае ($L_i = 15.5$ см). Однако время развития тангенциальной неустойчивости до появления устойчивых спиновых детонационных волн затянулось до 80 мс. Образовавшиеся в начале процесса четыре ПДВ к концу фоторегистрации трансформировались в две. При этом высота фронта детонации во время всего процесса была больше параметра L_i .

В серии опытов с $L_i = 27$ см инициирование детонации производилось как при установившейся подаче исходных компонентов в камеру 1, так и в переходном режиме. В последнем случае детонационная волна из камеры 2 приходила в камеру 1 по переобогащенной водородом смеси, так как клапан водорода был уже открыт, а клапан воздуха открылся перед этим всего за несколько миллисекунд. В результате воздух не успел заполнить коллектор и с возрастающим расходом поступал в камеру. При этом детонационная волна вырождалась в ударную, доходила до торца камеры и после отражения поджигала смесь. Далее в горящей смеси появлялась высокочастотная неустойчивость, переходящая через 10 мс в режим НСД. Имели место режимы инициирования, когда в камере 2 осуществлялось самовоспламенение потока смеси с быстрым переходом в детонацию. На осциллограмме самовоспламенение сопровождалось резким повышением давления в камере 1 до пережигания проволочки в камере 2. Также были реализованы режимы детонации, когда инициирующая детонационная волна входила в камеру 1 до подачи компонентов смеси. В камере 1 инициирующая детонационная волна вырождалась в ударную, но продуктами детонации поджигалась струя ацетилена с кислородом, предназначенная для подсветки. По оценке расход смеси ацетилена с кислородом составлял около 20 г/с ($\phi_3 \approx 1$). При поступлении исходных компонентов в камеру 1 образованная ими смесь воспламенялась, и через 7 мс возникающая тангенциальная неустойчивость переходила в устойчивые ПДВ. Образовавшиеся вначале четыре ПДВ к концу фоторегистрации процесса трансформировались в две. При этом высота фронта детонации во время всего процесса была меньше параметра L_i .

Проводились опыты по прямому инициированию водородовоздушной смеси в камере 1 пережиганием полоски алюминиевой фольги разрядом с энергией 5 Дж. В этих опытах, как

правило, очаг воспламенения в пределах камеры (по крайней мере, на расстоянии от инициирующего ввода до окна 15 см) переходил в детонацию и процесс установления НСД не отличался от подрыва детонатором [10] и детонационной волной, формируемой в камере 2 (см. рис. 2). Однако в ряде опытов, как и в случае описанного выше инициирования струей продуктов, в камере вначале наблюдалось обычное горение (до 10 мс) и затем за счет усиления возникающей высокочастотной тангенциальной неустойчивости развивалась НСД.

На рис. 4 приведены обобщающие (для всех значений параметра L_i) зависимости скорости НСД от удельного расхода смеси в камеру 1 $g_{\Sigma 1} = (G_{a1} + G_{f1})/S_{c1}$. При наибольших расходах смеси в обеих камерах на начальной стадии процесса в камере сгорания 1 устанавливались, как правило, четыре слабые волны НСД, вращающиеся со скоростью $D = 1.1 \pm 0.1$ км/с. По мере снижения расхода смеси число волн уменьшалось, а их скорость возрастала. В конце эксперимента в зависимости от соотношения компонентов смеси устанавливались либо две волны, либо одна, вращающиеся со скоростью $D = 1.25 \pm 0.15$ км/с. Большие значения скорости соответствуют соотношениям компонентов, близким к стехиометрии. На рис. 4 число волн в течение эксперимента можно определить, отсчитывая их от минимального значения $g_{\Sigma 1}$. С увеличением $g_{\Sigma 1}$ каждый переход на меньшую скорость НСД соответствует увеличению числа волн на одну единицу.

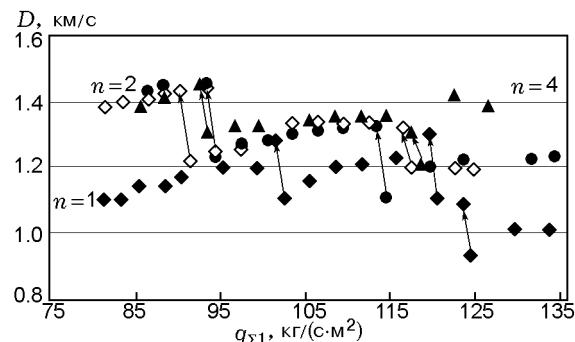


Рис. 4. Зависимости скорости НСД от удельного расхода смеси в камеру 1:

▲ — $L_i = 2$ см, $\phi_1 = 1.21 \rightarrow 1.05$; ◆ — $L_i = 15.5$ см, $\phi_1 = 0.75 \rightarrow 0.65$; ◇ — $L_i = 15.5$ см, $\phi_1 = 1.16 \rightarrow 0.98$; ● — $L_i = 27$ см, $\phi_1 = 1.18 \rightarrow 1.04$; стрелками показаны переходы к меньшему числу волн при уменьшении $g_{\Sigma 1}$

2.2. Инициирование детонации в потоках пропано-, метано-, керосиновоздушных смесей

Для инициирования детонации канал 4 располагался на расстоянии $L_i = 27$ см.

Пропановоздушная смесь. Для камеры 1 использовалась форсунка F1, начальные давления в ресиверах $p_{r,a10} = 31 \cdot 10^5$ Па и $p_{r,f10} = (8.5 \div 8.75) \cdot 10^5$ Па. Давление в ресивере пропана было ограничено давлением насыщенных паров в штатном баллоне при комнатной температуре. Поэтому для создания максимального расхода пропана применялась форсунка с наибольшим сечением отверстий (F1, см. табл. 1), и под этот удельный расход ($g_{f1} = 10 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$) подбирались начальное давление воздуха в ресивере, чтобы приблизить соотношение компонентов к стехиометрии.

Инициирование детонации в камере 1 производилось в переходном режиме подачи компонентов вблизи максимума давления в коллекторах, т. е. условия для возбуждения детонации были благоприятные ($\phi_1 = 1.7$). В установившемся режиме соотношение компонентов изменилось в диапазоне $\phi_1 = 0.74 \rightarrow 0.99$.

После прохождения инициирующей детонационной волны по камере 1 и последующих отражений в виде ударных волн от торца камеры устанавливалось обычное турбулентное горение. Сразу после инициирования процесса давления в камере p_{c1}, p_{c2}, p_{c3} принимали значения $4.2 \cdot 10^5$, $5.3 \cdot 10^5$ и $2.6 \cdot 10^5$ Па соответственно.

Метановоздушная смесь. За счет повышенного давления метана в ресивере стало возможным увеличение расходов метана и давления в камере перед инициированием. В отличие от инициирования детонации в потоке пропановоздушной смеси, при подходе к торцу камеры детонационная волна, вышедшая из инициатора 2, претерпела распад на ударный фронт и фронт горения. При отражении ударной волны от торца камеры произошла вспышка свежей смеси. Детонация и даже горение не получили дальнейшего развития в камере, и при изменении коэффициента избытка горючего в течение эксперимента в диапазоне $\phi_1 = 1.32 \rightarrow 0.95$ смесь сгорала за ее пределами.

Керосино- и бензиновоздушные смеси. При подаче жидких топлив в камере 1 устанавливали форсунку F3 (см. табл. 1). Для двухфазных смесей шире возможности по обеспечению необходимых расходов обоих компонентов. Си-

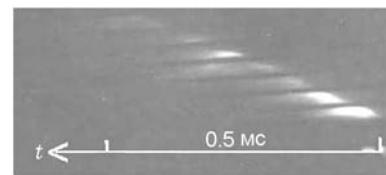


Рис. 5. Инициирование детонации в потоке керосиновоздушной смеси в кольцевой цилиндрической камере 1 детонационной волной, сформированной в вихревой плоскорадиальной камере 2:

после прохождения первичной детонационной волны происходит горение смеси вне камеры 1

стема подачи воздуха позволяла увеличить его удельный расход до $g_{a1} = 590 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при $p_{r,a10} = 100 \cdot 10^5$ Па. Однако, так же как и для рассмотренных выше углеводородных газовых топлив, с помощью инициатора 2 в камере 1 удалось возбудить только одну детонационную волну (рис. 5), средняя фазовая скорость которой вверх по потоку на расстоянии 42 см от торца камеры составляла $\approx 1 \text{ км}/\text{с}$, а у торца камеры — $0.9 \text{ км}/\text{с}$. Эта волна дошла до торца камеры и с учетом скорости потока ($\approx 0.7 \text{ км}/\text{с}$) являлась детонационной. При ее отражении все процессы горения в камере прекратились и были вынесены за ее пределы. К моменту инициирования поток двухфазной смеси в камере 1 был установленным, а давления p_{c1}, p_{c2}, p_{c3} равнялись $1.7 \cdot 10^5$, $1.9 \cdot 10^5$ и $2.5 \cdot 10^5$ Па соответственно. Сразу после инициирования их значения составили $3 \cdot 10^5$, $3.5 \cdot 10^5$ и $3.7 \cdot 10^5$ Па.

Реализовать НСД в камере 1 оказалось возможным при обогащении воздуха кислородом, поступающим в трубопровод воздуха перед коллектором (штриховая стрелка слева на рис. 1). Отметим, что в этих экспериментах в камеру 1 вначале поступал кислород, а инициирование бензинокислородной смеси осуществлялось пережиганием проволочки (камера 2 не работала).

На рис. 6 показан фрагмент фоторегистрограммы инициирования смеси (первая дорожка) и процесса НСД (вторая дорожка, BC — фронт ПДВ) в бензине. Инициирующий импульс подан в тот момент, когда в камере накопилась бензинокислородная смесь с коэффициентом избытка горючего $\phi_1 = 2$. Детонационная волна AA_1 пошла во все стороны от инициатора и вызвала горение поступающей в камеру бензинокислородной смеси. С поступле-

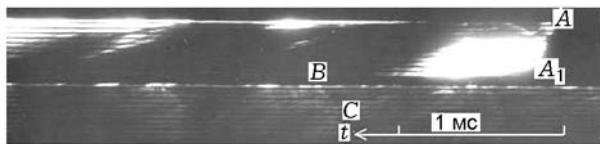


Рис. 6. Инициирование НСД бензиновоздушной смеси, обогащенной кислородом ($[O_2]/[N_2] = 0.49$), в кольцевой цилиндрической камере 1 при постепенном разбавлении кислорода воздухом (фрагмент)

нием воздуха (через 7 мс после инициирования) соотношение компонентов горючей смеси приблизилось к стехиометрии ($\phi_1 = 0.88$) и в камере появилась высокочастотная тангенциальная неустойчивость, перешедшая в НСД с одной волной через 20 мс от начала инициирования. При этом соотношение кислород/азот (по массе) составляло $[O_2]/[N_2] = 0.49$, а другие параметры имели значения: $\phi_1 = 0.9$, p_{c1} , p_{c2} , $p_{c3} = 5 \cdot 10^5$, $5.2 \cdot 10^5$ и $2.9 \cdot 10^5$ Па соответственно, $D = 0.93$ км/с. В конце зарегистрированного на пленку детонационного процесса (через 175 мс после инициирования) $D = 0.73$ км/с и $[O_2]/[N_2] = 0.41$.

При сжигании керосина существенных отличий от опытов с бензином не наблюдалось. Также после инициирования существовало горение керосинокислородной смеси при $\phi_1 = 2$, затем после подачи воздуха появлялась высокочастотная тангенциальная неустойчивость, перешедшая в НСД с одной волной той же структуры и примерно с теми же скоростями детонации.

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Водородовоздушная смесь

Во всех опытах в камере 1 происходило инициирование детонации водородовоздушной смеси детонационной волной, выходящей из камеры 2. То есть была осуществлена поставленная цель: с помощью малой энергии инициирования (пережигания проволочки или даже самовоспламенения) быстро (в течение долей миллисекунды) вызвать детонацию в инициаторе и перевести ее в поток смеси камеры кольцевой цилиндрической геометрии. Во всех опытах энергия электрического разряда на проволочке была преднамеренно завышена, чтобы гарантировать инициирование детонации в ка-

мере 2 в широком диапазоне соотношений компонентов смеси. Иногда до подрыва проволочки возникало самовоспламенение образующейся в камере 2 смеси.

Ни в одном опыте не наблюдалось прямого перехода инициирующей волны в устойчиво вращающуюся ПДВ. Всегда существовал переходный процесс ($4 \div 80$ мс), связанный с восстановлением равномерной подачи воздуха в камеру горения, нарушенной первичной детонационной волной. На осциллограмме (см. рис. 3, а) влияние инициирующей волны на систему подачи воздуха выражено в повышении давления в коллекторе воздуха $p_{t,a}$. Заметного влияния первичных детонационных и ударных волн на систему подачи водорода не обнаружено, что связано с относительно малым проходным сечением отверстий форсунки горючего. Подобный переходный режим наблюдался и при инициировании НСД в этой же камере с помощью электродетонатора с массой ВВ 0.2 г [10]. В камерах типа жидкостных ракетных двигателей, где слабо выражено влияние процессов в камере на систему подачи, в водородокислородной смеси устойчивая НСД устанавливалась за время двух оборотов волны после инициирующего импульса (≈ 0.15 мс) [13].

Еще медленнее развивалась НСД при инициировании зажиганием, так как в этом случае изначально отсутствовали ударные волны. Переходный режим мог длиться несколько десятков миллисекунд до появления тангенциальной неустойчивости и развития ее во вращающуюся детонацию. Подобные режимы инициирования сопровождались меньшими звуковыми эффектами, поскольку отсутствовала детонация скопившейся в камере смеси и ударные волны в окружающее пространство не выходили. Известно, что струйное инициирование горения нашло широкое применение для запуска ракетных и авиационных двигателей, в частности, с использованием инициирующих трубок Ранка, которые могут работать даже на керосиновоздушной смеси в режимах, допускающих самовоспламенение [14]. Не исключено применение и мощного электрического разряда, способного зажечь топливовоздушную смесь в основной камере с дальнейшим переходом горения в непрерывную спиновую детонацию. При этом будут обеспечены наиболее «мягкие» условия инициирования.

Детонация в камере 1 сопровождалась истечением продуктов из камеры 2. Это обсто-

ятельство сказалось на давлении в камере 1 и формировании НСД, а также ее протекании. Подобные явления наблюдались при дополнительной подаче воздуха в продукты НСД водородовоздушной смеси [15]. На выходе из камеры формировалось «полумассовое сопло» [16], повышающее давление в камере. Выяснилось, что наиболее быстро НСД устанавливалась при расположении канала для выхода детонации 4 на расстоянии $L_i = 27$ см и по времени переходного процесса НСД приближалась к случаю инициирования детонации электродетонатором [10]. В этом варианте верхний край канала 4 всегда оказывался ниже фронта ПДВ, даже в одноволновом режиме, высота которого составляла $h \approx 24$ см (длина участка камеры, включающего четыре окна). При увеличении числа волн до $n = 2, 3$ и 4 высота фронта ПДВ уменьшалась еще больше — до 12, 8 и 6 см соответственно. Поэтому продукты детонации, поступавшие из камеры 2, не попадали в зону смесеобразования. Появление четвертой волны в начале процесса связано с повышением давления в камере (почти в два раза), при котором снизилась величина критического для НСД слоя смеси. И даже при $n = 3$ высота фронта волны оказалась меньше, чем в случае без добавочной подачи [10]. Когда расход продуктов из камеры 2 значительно уменьшился ($G_{a2} \approx 0.6$ кг/с, $G_{f2} \approx 0.01$ кг/с через 0.2 с), размеры фронта ПДВ стали коррелировать с данными [10]. Тем не менее влияние продуктов, генерируемых в камере 2, проявлялось через увеличение давления в зоне смесеобразования. Отметим низкую скорость и повышенное количество ПДВ (см. рис. 4) по сравнению с НСД в камере той же геометрии при тех же удельных расходах [10]. В камере складывается ситуация, сходная с истечением продуктов в среду с повышенным противодавлением, когда звуковые возмущения, идущие снаружи, проникают до начала камеры [13].

В варианте $L_i = 15.5$ см на стадии спирального детонационного режима с тремя и двумя волнами в область смесеобразования не затекали продукты из камеры 2, но при одноволновом режиме затекание имело место, по крайней мере, вблизи канала 4. Однако это не повлияло заметно на процесс, тем более что одноволновый детонационный режим наблюдался в конце процесса при пониженных расходах продуктов из камеры 2.

При $L_i = 2$ см в начале процесса обнару-

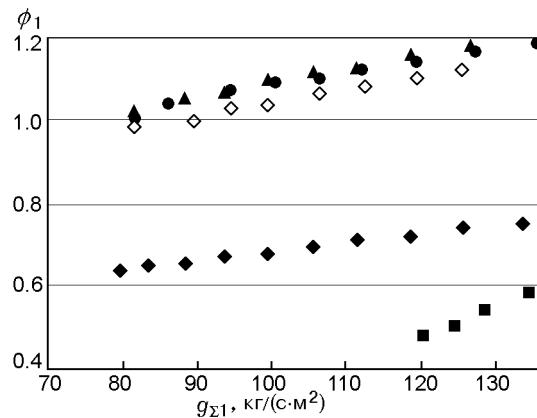


Рис. 7. Область реализованных режимов НСД водородовоздушной смеси:

▲ — $L_i = 2$ см, ◆ — $L_i = 15.5$ см, ◊ — $L_i = 15.5$ см, ● и ■ — $L_i = 27$ см

жено сильное влияние на смесеобразование в камере 1 продуктов, истекавших из камеры 2, поскольку их истечение всегда происходило в области распространения фронта ПДВ. Только когда расходы продуктов уменьшились в два раза ($G_{a2} \approx 1.1$ кг/с, $G_{f2} \approx 0.028$ кг/с), в камере 1 стабилизировалась НСД. Добавим, что в этом случае длина коллектора воздуха камеры 1 составляла 21 см вместо 7 см в предыдущих опытах (см. рис. 1). Однако такое увеличение не повлияло на стабильный детонационный процесс.

На рис. 7 приведена область реализованных режимов НСД в координатах $g_{\Sigma 1}, \phi_1$. Достигнут нижний концентрационный предел существования НСД по коэффициенту избытка горючего — $\phi_1 \approx 0.48$ при $g_{\Sigma 1} = 120$ кг/(с·м²).

3.2. Метано-, пропано-, керосиновоздушные смеси

При инициировании детонации в потоках этих смесей выход инициирующего устройства 4 устанавливался на расстоянии $L_i = 27$ см. Выбор такой дистанции обоснован тем, что в данных смесях, являющихся химически менее активными, ожидалось реализовать не более одной ПДВ. То есть на расстоянии $L_i = 27$ см поток продуктов оказывал бы наименьшее влияние на смесеобразование. Отметим, что поток продуктов из камеры 2 увеличивал давление в камере 1 и способствовал снижению величины критического слоя подготовленной для детонации смеси, как это было показано выше при исследовании детонации водородовоздушной смеси.

Пропановоздушная смесь. Ранее [10] при инициировании электродетонатором возбуждалось лишь горение топливовоздушной смеси за пределами камеры, а одноволновый спиновой режим реализовывался только при обогащении воздуха кислородом в соотношении $[N_2] : [O_2] = 1 : 1$ (смесь воздуха с кислородом приготавливалась заранее). Было не ясно, связано ли это с малостью диаметра камеры или с недостаточной энергией инициирования. В настоящей работе детонационной волной удалось возбудить только горение внутри камеры 1. Таким образом, главной причиной невозможности реализации НСД пропановоздушной смеси в камере диаметром 306 мм при указанных диапазонах расходов является ее малый диаметр. Инициирование классической детонации этой смеси в камере проблем не вызывает.

Метановоздушная смесь. Скорость химических реакций в этой смеси настолько замедлена, что фронт пламени не может удержаться внутри камеры 1 и выбрасывается наружу. Оценка минимального диаметра камеры, при котором возможна НСД, затруднительна из-за отсутствия необходимых данных по детонации движущихся и смешивающихся топливных потоков. Тем не менее классическая детонация топливовоздушной смеси в камере с помощью инициирующей детонационной волны в данных условиях осуществима.

Керосиновоздушная смесь. Эту смесь, как и метановоздушную, удалось скечь в детонационной волне в камере (см. рис. 5), однако продукты детонации выбрасывались за пределы камеры и инициировали там горение. По отсутствию НСД в данной камере можно констатировать, что ее диаметр меньше необходимого минимального. Следует отметить, что в камере к моменту прихода инициирующей детонационной волны создавалось достаточно высокое давление. Например, для случая, соответствующего рис. 5, давление в камере на расстоянии 10 см от форсунки горючего при истечении холодной смеси составляло $p_{c2} = 1.9 \cdot 10^5$ Па, а после прихода детонационной волны увеличилось до $p_{c2} = 4 \cdot 10^5$ Па. Через несколько миллисекунд давление резко понизилось до $3 \cdot 10^5$ Па, затем стало уменьшаться, приблизившись через 140 мс к давлению, создаваемому холодными компонентами смеси (при сравнении с осциллограммой холостого выстрела без инициирования детонации в кольцевой камере).

В работе [10] в такой же камере удалось осуществить НСД керосина с воздухом, обогащенным кислородом в соотношении $[N_2] : [O_2] = 1 : 1$. Смесь воздуха и кислорода составлялась заранее и напускалась в ресивер перед опытом. Процесс инициировался детонатором. В данной работе проверялась возможность «плавного» запуска в топливовоздушную смесь детонации, предварительно инициированной в этой же камере 1 в керосинокислородной смеси. С увеличением концентрации воздуха (включая и переходный процесс с заполнением коллектора смесью, где расход кислорода можно считать постоянным) концентрация кислорода в смеси монотонно уменьшалась, однако отношение $[O_2]/[N_2]$ изменялось незначительно — от 0.49 до 0.41. Поэтому снижение скорости детонационной волны и изменение ее структуры происходили не по причине незначительного обеднения смеси кислородом, а из-за уменьшения давления в камере. Тот факт, что при вдуве чистого кислорода как для керосина, так и для бензина в камере устанавливалось обычное горение, можно объяснить малым временем подачи чистого кислорода, не превышающим длительность переходного процесса в камере (≈ 10 мс).

ВЫВОДЫ

1. Реализована передача детонации в поток топливовоздушной смеси (водородно-, пропано-, метано- и керосиновоздушной) с помощью инициирующей детонационной волны, сформированной в течение долей миллисекунды импульсом малой энергии или самовоспламенением водородовоздушной смеси в вихревой плоскорадиальной камере.

2. Для формирования НСД топливовоздушной смеси в камере проточного типа с помощью инициирующей детонационной волны необходимо время переходного процесса до десятка миллисекунд, что связано с воздействием этой волны на систему подачи и с нарушением подачи компонентов смеси, особенно воздуха.

3. В переходном процессе, возникающем после прохождения инициирующей детонационной волны по потоку топливовоздушной смеси, наблюдается обычное горение смеси и развитие тангенциальной неустойчивости с переходом в устойчивый детонационный режим. Поэтому в камере проточного типа можно реализовать «мягкое» струйное инициирование

НСД топливовоздушной смеси продуктами горения, а также тепловым импульсом малой мощности, которые способны вызвать горение исходной смеси.

4. Для организации НСД химически менее активных топливовоздушных смесей при использовании в качестве горючего пропана, метана, керосина и бензина необходимы камеры большего, чем 306 мм, диаметра. Детонация этих смесей в принципе возможна и в данной камере, но необходимо обогащение воздуха кислородом для бензина и керосина в соотношении $[O_2]/[N_2] \geq 0.41$.

ЛИТЕРАТУРА

- Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective // Progr. in Energy and Combust. Sci. — 2004. — V. 30. — P. 545–672.
- Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Continuous spin detonations // J. Propulsion and Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1204–1216.
- Васильев А. А. Особенности применения детонации в двигательных установках // Импульсные детонационные двигатели / под ред. С. М. Фролова. — М: Торус пресс, 2006. — С. 129–158.
- Быковский Ф. А., Ждан С. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф. Исследование самовоспламенения и особенностей течения в плоской вихревой камере // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 6. — С. 26–41.
- Bykovskii F. A., Vedernikov E. F., Polozov S. V., Golubev Yu. V. Initiation of detonation in a vortical flow hydrogen-air mixtures// Pulsed and Continuous Detonations / G. Roy, S. Frolov, J. Sinibaldi (Eds). — Moscow: Torus press, Ltd, 2006. — P. 326–331.
- Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф., Полозов С. В., Голубев Ю. В. Инициирование детонации в потоках водородовоздушных смесей // Импульсные детонационные двигатели / под ред. С. М. Фролова. — М.: Торус пресс, 2006. — С. 521–540.
- Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф., Полозов С. В., Голубев Ю. В. Инициирование детонации в потоках топливовоздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 3. — С. 110–120.
- Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Способ инициирования детонации в горючих смесях и устройство для его осуществления. — Пат. РФ № 2333423, зарегистрирован 10.09.2008.
- Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф. Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 2. Вихревая структура течения // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 1. — С. 41–49.
- 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.
- Быковский Ф. А. Высокоскоростной ждущий фоторегистратор // Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии. — 1981. — № 2. — С. 85–89.
- 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.
- Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Исследование непрерывной спиновой детонации водородокислородных смесей. 1. Камеры кольцевой цилиндрической геометрии // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 2. — С. 32–45.
- Пиралишвили Ш. А., Поляев В. М., Сергеев М. Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. — М.: УНПЦ «Энергомаш», Изд-во «Инженер», 2000.
- Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная спиновая детонация водородовоздушной смеси с добавкой воздуха в продукты и в зону смесеобразования // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 60–68.
- Феодосьев В. И. Основы техники ракетного полета. — М.: Наука, 1979.

Поступила в редакцию 20/II 2013 г.