

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ПОТОКАХ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Ф. А. Быковский<sup>1</sup>, Е. Ф. Ведерников<sup>1</sup>, С. В. Полозов<sup>2</sup>, Ю. В. Голубев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, bykovs@hydro.nsc.ru

<sup>2</sup>Институт геофизики СО РАН, 630090 Новосибирск

Впервые в управляемом режиме отдельной подачи топлива водород — воздух в плоскорadiaльную вихревую камеру осуществлены режимы самовоспламенения образующейся топливной смеси с быстрым (0.2 мс) переходом в детонацию. Самовоспламенение возникает в области стехиометрии с небольшим (до 6 ÷ 30 %) обогащением смеси водородом и, как правило, в дозвуковом потоке. Определены энергии гарантированного инициирования детонации для камер различной геометрии с различным соотношением топливных компонентов путем использования теплового импульса при пережигании проволоочки электрическим током. Гарантированное возбуждение детонации реализуется энергией 0.1 Дж. Выяснено, что основной вклад энергии в поток смеси происходит на стадии испарения (ионизации) меди пережигаемой проволоочки. Обнаружено затухание непрерывного спиновое детонационного режима при уменьшении выходного сечения камеры. В режиме горения, как детонационного, так и обычного турбулентного, давление на периферии вихревой плоскорadiaльной камеры уменьшается, а у выхода из отверстия увеличивается по сравнению с режимом истечения холодных топливных компонентов.

Ключевые слова: самовоспламенение, пережигаемые проволоочки, инициирование детонации, топливо, вихревая камера сгорания, непрерывная спиновая детонация.

### ВВЕДЕНИЕ

Повышенное внимание к вопросу инициирования детонации топливно-воздушных смесей связано с проблемой детонационного сжигания топлива в камерах сгорания двигателей и энергетических установок. Особенно остро с этой задачей столкнулись при разработке пульсирующих воздушно-реактивных двигателей [1, 2]. Выяснилось, что для инициирования детонации в потоке топливно-воздушной смеси источником малой мощности (искрой) необходимо использование либо длинных труб, превышающих длину преддетонационного участка, либо форкамер-преддетонаторов, в которых детонационная волна создается в топливно-кислородной смеси, а затем переходит в топливно-воздушную смесь. Однако в первом случае это увеличивает габариты и снижает частоту рабочего процесса, а во втором случае требует дополнительного и опасного окислителя — кислорода. Использование детонаторов для прямого инициирования детонации при непрерывной циклической работе камеры недо-

пустимо по многим причинам, в том числе и по условиям прочности конструкций. Результаты расчетов [3] показывают, что уменьшить энергию инициирования электрической искрой покоящейся и движущейся топливно-воздушной смеси можно путем повторного инициирования. В экспериментах с помощью установки препятствий в проходном сечении трубы [4] или применения спирали Щёлкина и специальной конструкции детонационных труб, а также при повторном инициировании горячей смеси электрической искрой удалось значительно снизить преддетонационные расстояния топливно-воздушной смеси и суммарную энергию инициирования [5, 6]. Целью данной работы было осуществление самопроизвольного инициирования детонации водородно-воздушных смесей в малогабаритной камере и определение минимальной энергии инициирования, гарантирующей развитие детонации. Задача решалась с помощью формирования особого рода течения в камере сгорания. Источником энергии служил тепловой импульс, создаваемый пережиганием током проволоочки.

В работе [7] было замечено, что в вихревой плоскорadiaльной камере ( $d_1 \gg H$ , где  $d_1$  — диаметр камеры,  $H$  — расстояние меж-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-01-00298) и фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ 2073.2003.1).

ду плоскими стенками) во всех используемых топливно-кислородных смесях, в том числе и керосинокислородных, на первых же миллисекундах после подачи топливных компонентов в камеру самопроизвольно развивалась детонация. Это явление изучалось экспериментально и численно в работах [8–10]. Было показано, что детонация может инициироваться и при разбавлении кислорода воздухом. С уменьшением доли кислорода в смеси задержка самовоспламенения возрастала. Причем при составлении смеси непосредственно перед экспериментом (не было смешения кислорода с воздухом на молекулярном уровне) задержка самовоспламенения уменьшалась. В случае, когда кислород подавался после воздуха, самовоспламенение возникало при его добавке в количестве 2.5 % по объему. Наблюдался единичный факт самовоспламенения водорода в потоке чистого воздуха. Нельзя объяснить этот феномен влиянием средней температуры, так как ее повышение во время заполнения камеры смесью не превосходило 410 К. Были случаи самовоспламенения и в условиях уже установившегося потока, когда его температура была ниже комнатной. В то же время известно [11], что для воспламенения водорода в потоке воздушной смеси (в условиях ударной трубы) необходимо, чтобы в течение нескольких миллисекунд температура последнего поддерживалась на уровне 930 К. Таким образом, механизм самовоспламенения остался невыясненным.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ КАМЕРА, УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

### 1.1. Экспериментальная камера

Схема экспериментальной камеры приведена на рис. 1. Камера представляла собой полузамкнутый объем, ограниченный стенками: одной цилиндрической диаметром  $d_1 = 204$  мм и двумя плоскими радиальными, расположенными на расстоянии  $H = 15, 10$  или 5 мм. Для выхлопа продуктов сгорания в одной из плоских стенок имелось отверстие с цилиндрическим насадком длиной 40 мм. Диаметр отверстия варьировался в различных опытах —  $d_2 = 100, 70, 50$  и 40 мм. В ряде опытов в камере устанавливались цилиндрические вставки: вставки диаметром  $d_3 = 90, 40$  и 30 мм вставлялись в отверстия диаметром  $d_2 = 100, 70, 50$  мм соответственно. Серия экспериментов была проведена при полностью закрытом

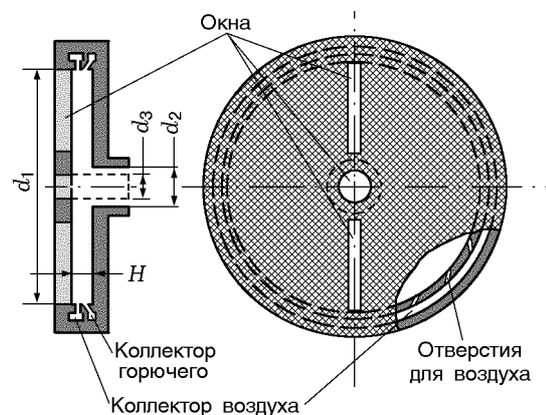


Рис. 1. Камера сгорания

отверстия  $d_2$ , причем торцевая поверхность заглушки устанавливалась заподлицо с поверхностью стенки камеры. Таким образом, создавалась полностью замкнутая плоскорадиальная полость, имитирующая камеру двигателя внутреннего сгорания. На противоположной плоской стенке на расстоянии 70 мм от центра устанавливался ввод для инициирования воспламенения. На этой же стенке имелись два радиальных окна и одно круглое окно из оргстекла для фотосъемки. В ряде опытов для фиксирования момента пережигания проволочки электроды устанавливались непосредственно в оргстекле на том же расстоянии от центра. Процесс инициирования детонации записывался на пленку фоторегистратора, движущуюся перпендикулярно большей стороне окон. Скорость движущихся светящихся объектов вдоль окон камеры определялась методом развертки —  $v_r = k \operatorname{tg} \alpha_v v_p$ , где  $k = 20.2$  — коэффициент уменьшения изображения,  $\alpha_v$  — угол наклона траектории к горизонтали,  $v_p = 100$  м/с — скорость движения пленки. Спиновые детонационные волны фиксировались с частичной компенсацией скорости через одно окно и с полной раскомпенсацией — через другое окно, так как двигались в противоположных направлениях. Скорость спиновых волн определялась по методике, изложенной в работе [12].

Система подачи воздуха включала в себя ресивер емкостью 3.2 л, из которого воздух сначала поступал в кольцевой коллектор с площадью поперечного сечения  $4 \text{ см}^2$ , а затем — в камеру через ряд отверстий, равномерно расположенных вдоль цилиндрической стенки каме-

Параметры форсунок

Форсунка	Сечение отверстий, мм	Количество отверстий	Общая площадь полного сечения отверстий, мм <sup>2</sup>
F1	0.3×0.5	180	27
F2	0.3×0.25	180	13.5
A1	0.5×1.2	300	180
A2	1.0×4.0	50	200
A3	10×10	2	200

ры и направленных под углом  $30^\circ$  к касательной цилиндрической поверхности (см. рис. 1). В нескольких опытах воздух, минуя коллектор, поступал в камеру через два отверстия большого сечения, направленных по касательной к цилиндрической поверхности. Горючее (водород) из ресивера объемом 1.6 л подавалось в кольцевой коллектор с площадью поперечного сечения  $1 \text{ см}^2$ , а затем поступало в камеру через ряд отверстий, равномерно расположенных по окружности камеры и направленных под углом  $45^\circ$  к образующей цилиндрической поверхности и под углом  $45^\circ$  к поверхности плоских стенок навстречу потоку. Параметры различных форсунок воздуха (А) и горючего (F) представлены в таблице. Использовались различные комбинации этих форсунок.

## 1.2. Измерение давлений и расходов газов

Распределение статического давления в камере ( $P_c$ ) вдоль радиуса измерялось с помощью тензометрических датчиков с разрешающей способностью 0.1 мс, установленных на расстоянии 1 см друг от друга. Такими же датчиками измерялось давление в ресиверах воздуха ( $P_A$ ) и водорода ( $P_f$ ), а также давление в соответствующих коллекторах ( $P_{m,A}$ ) и ( $P_{m,f}$ ). Измеренные давления в коллекторах были близки к давлениям торможения вследствие малых скоростей потока в коллекторах. Характерные осциллограммы указанных параметров, соответствующие режиму без инициирования, представлены на рис. 2. Чтобы не загромождать рисунок, приведена только одна осциллограмма  $P_c$ , соответствующая радиусу  $R_c = 98 \text{ мм}$  (на расстоянии 4 мм от цилиндрической стенки).

Подача воздуха и водорода из ресиверов осуществлялась через быстродействующие

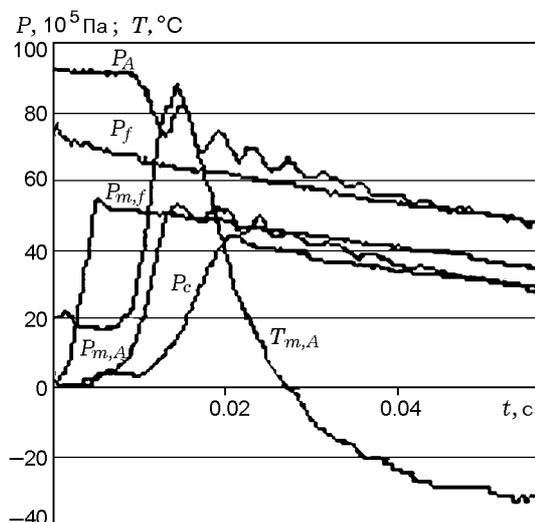


Рис. 2. Типичная осциллограмма параметров процесса в опыте без инициирования детонации ( $d_2 = 50 \text{ мм}$ ,  $d_3 = 30 \text{ мм}$ )

электромагнитные клапаны с временем открытия около 1 мс (не считая времени переходного процесса в электромагнитной системе). Начальное давление воздуха в ресивере варьировалось в пределах  $P_{A,0} = (102 \div 23) \cdot 10^5 \text{ Па}$ , водорода —  $P_{f,0} = (100 \div 20) \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Если к моменту инициирования детонации давления газов в соответствующих коллекторах уже превысили максимум (см. рис. 2), то их расход определялся по изменению давления в ресивере [13]. Поскольку инициирование образующейся в камере смеси часто происходило в условиях возрастания давлений в коллекторе воздуха и коллекторе водорода (сразу после открытия клапанов), расходы топливных компонентов через соответствующие форсунки определялись по известной формуле  $G = \mu \rho v S$ . Здесь  $\mu$  — коэффициент расхода, который принимался равным 0.8 [13],  $\rho$  и  $v$  — плотность и скорость газа в отверстиях с площадью сечения  $S$ . Для определения плотности газа в коллекторе  $\rho_m$  недостаточно знать только давление  $P_m$ , так как в переходном режиме истечение из ресивера в коллектор не является изоэнтропическим, поскольку производится работа сжатия над газом, поступающим в коллектор [10]. Поэтому измерялась также температура торможения газа в коллекторах ( $T_m$ ) с помощью быстродействующих термопар [9]. По измеренным величинам  $P_m$  и  $T_m$  из уравнения состояния газа  $RT_m = P_m / \rho_m$ , где  $R$  — газовая постоянная, определялась плотность газа в кол-

лекторе. В самом начале заполнения коллекторов истечение газа через форсунки происходило со скоростью звука ( $P_m/P_c \geq 1.86$ ), поэтому параметры истечения газа определялись по формулам  $\rho = \rho_* = \rho_m [2/(\gamma + 1)]^{1/(\gamma-1)}$ ,  $v = c_* = c_m [2/(\gamma + 1)]^{0.5}$ , где  $\rho_*$  и  $c_*$  — плотность и скорость газа в критическом сечении отверстия форсунки,  $\gamma$  — отношение удельных теплоемкостей газа. При дозвуковом истечении газа через форсунку ( $P_m/P_c < 1.86$ ) расход газа определялся уже по уменьшению давления в соответствующем ресивере. Погрешность в определении расхода газов при истечении из ресиверов не превышала 3 %, ее оценку можно найти в работе [13]. В области инициирования детонации расход воздуха изменялся в пределах  $G_A = 3 \div 0.4$  кг/с, водорода —  $G_f = 0.065 \div 0.04$  кг/с.

### 1.3. Определение энергий инициирования

Инициирование детонации водородно-воздушной смеси производилось пережиганием электрическим током медных проволочек длиной 2 мм и диаметром  $d_w = 0.07, 0.1$  или 0.13 мм. Проволочки припаивались на электроды и устанавливались заподлицо со стенкой камеры на расстоянии 32 мм от цилиндрической поверхности камеры.

Принципиальная схема инициирующего устройства представлена на рис. 3. Разрядный конденсатор С1 через зарядное сопротивление R1 заряжался до напряжения 30 В. В заданный по схеме управления момент времени открывались транзисторы VT1–VT10 и происходил разряд конденсатора на проволочку W. Время включения тока (транзисторов) составляло 0.2 мкс. Для ограничения разрядного тока (до 1300 А) устанавливались сопротивления R2, R4–R12. Время разряда могло ограничиваться

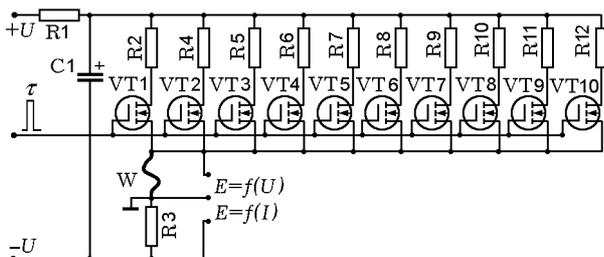


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема поджига проволочек

ся временем открытия транзисторов, задаваемым генератором прямоугольных импульсов (временем импульса  $\tau$ ).

Измерение тока  $I$  проводилось с калиброванного шунта R3, подсоединенного в электрическую цепь, а напряжения  $U$  — непосредственно на концах пережигаемой проволочки. Площадь сечения всех токоподводящих проводов была не менее 2 мм<sup>2</sup>. Для уменьшения паразитных индуктивности и емкости цепи устройство для иницирования располагалось на минимально возможном расстоянии от электропровода в камеру (крепилось на самой камере). Сигналы напряжения и тока регистрировались компьютерной системой с разрешением (временем дискретизации) 0.78 мкс. Выделившаяся энергия  $E_i$  определялась по формуле  $E_i = \int_0^t IU dt$ .

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Во всех опытах водород подавался в камеру раньше воздуха (см. рис. 2). Соотношение компонентов в камере постоянно менялось — от переобогащения водородом во время нарастания давления воздуха в коллекторе до его недостатка в установившемся процессе истечения газов, поскольку опорожнение ресивера с воздухом происходило быстрее, чем ресивера с водородом. «Установившимся» процесс истечения можно считать лишь условно, поскольку и в этом случае расходы компонентов уменьшались, но происходило это плавно, без повышения температуры газа в коллекторах. Таким образом, образующаяся в камере смесь дважды проходила через состояние стехиометрии — во время переходного и установившегося процессов истечения компонентов в камеру.

### 2.1. Самовоспламенение

В первой серии опытов велся целенаправленный поиск условий, при которых возможно самовоспламенение водородно-воздушной смеси. Вначале устанавливалась геометрия камеры и следующие условия подачи:  $d_2 = 40$  мм,  $H = 15$  мм, комбинация форсунок F1/A1, начальные давления в ресиверах водорода и воздуха  $P_{f0} = 78 \cdot 10^5$  Па,  $P_{A0} = 93 \cdot 10^5$  Па соответственно. В одном из десяти опытов наблюдалось самовоспламенение во время переходного процесса (рис. 4). Очаг воспламенения



Рис. 4. Типичная фоторегистрограмма самовоспламенения водородно-воздушной смеси с переходом в детонацию:

комбинация форсунок F1/A1,  $d_2 = 40$  мм,  $H = 15$  мм, в момент инициирования  $P_c = 44 \cdot 10^5$  Па в точке  $R_c = 70$  мм,  $\phi = 1.1$

появлялся внутри камеры вне окон. При подходе к окнам фронт свечения распространялся с фазовой скоростью  $\approx 605$  м/с вдоль окна. При отражении от цилиндрической стенки возникала детонационная волна, движущаяся со скоростью  $D = 1850$  м/с. По показаниям датчика статического давления, установленного на радиусе камеры  $R_c = 70$  мм, давление в этот момент равнялось  $P_c = 44 \cdot 10^5$  Па, а коэффициент избытка горючего —  $\phi = 1.1$ . Из рис. 4 видно, что процессы в выходном сечении камеры непосредственно не влияют на самовоспламенение образующейся смеси. Здесь и в дальнейшем для оценки уровня давления в камере использовалось его значение в точке  $R_c = 70$  мм, где в последующих опытах устанавливалась инициирующая проволока. Давление в этой точке является промежуточным между максимальным давлением на периферии камеры и минимальным на краю выходного отверстия. Также отметим, что вблизи этой точки в ядре потока осуществлялся переход течения от квазитвердого вращения к потенциальному вихрю [8, 9]. В случае необходимости значения давления в других точках камеры будут оговариваться особо. В работе [10] при обогащении воздуха кислородом случайно удалось зафиксировать появление очага воспламенения напротив окон вблизи периферии камеры, на расстоянии  $2/3$  радиуса камеры. Ввиду большей химической активности этих смесей инициирование детонации происходило в первой ускоряющейся волне до ее отражения от цилиндрической стенки камеры.

Для дальнейшего поиска условий самовоспламенения были проведены опыты с форсункой горючего F2 с площадью сечения отверстий в два раза меньшей, чем у форсунки F1. Для ввода воздуха использовалась форсунка A2 с более крупными отверстиями, чем в A1, но с одинаковой общей площадью сечения. Гео-

метрия камеры и система подачи, а также начальные уровни давлений компонентов в ресиверах не изменялись. Форсунка F2 позволяла выдерживать меньшее падение давления в коллекторе водорода во время его поступления в камеру. В этой серии экспериментов каждый второй опыт сопровождался самовоспламенением. Самовоспламенение возникало в диапазоне давлений  $P_c = (20 \div 44) \cdot 10^5$  Па при небольшом избытке горючего —  $\phi = 1.06 \div 1.27$ . Достаточно широкий разброс давлений в камере и постоянство  $\phi$  наводят на мысль, что в камере данной геометрии при данной системе подачи компонентов смесь инициируется, когда при смешении образуется примерно стехиометрический состав. Самовоспламенение возникало как во время нарастания давления воздуха в коллекторе (увеличения его расхода), так и при установившемся режиме истечения, когда давление воздуха в коллекторе прошло через максимум. Обычно моменту самовоспламенения соответствовало дозвуковое истечение компонентов в камеру. Меньшую вероятность возникновения самовоспламенения при использовании форсунки F1 можно объяснить более быстрым прохождением того состояния, когда соотношение компонентов приближалось к стехиометрии. При увеличении диаметра выходного сечения камеры до  $d_2 \geq 50$  мм самовоспламенение не наблюдалось. Отметим, что при использовании чистого кислорода самовоспламенение имело место и в камере с  $d_2 = 100$  мм на ранней стадии его поступления в камеру при сверхзвуковом истечении [10].

Однако установка вставки диаметром  $d_3 = 30$  мм в отверстие  $d_2 = 50$  мм при сохранении той же площади выходного сечения камеры, что и в случае  $d_2 = 40$  мм ( $S_2 = 12.56$  см<sup>2</sup>), снова вызвало самовоспламенение смеси примерно с той же частотой повторения. Причем самовоспламенение стабильно возникало при давлении в камере  $\approx 27 \cdot 10^5$  Па как в переходном, так и в установившемся режиме в области стехиометрии. Установка вставки  $d_3 = 90$  мм в отверстие камеры  $d_2 = 100$  мм ( $S_2 = 14.9$  см<sup>2</sup>), а также уменьшение расстояния между плоскими стенками до  $H = 5$  мм в камере с  $d_2 = 70$  мм ( $S_2 = 11$  см<sup>2</sup>, определяемое уже не площадью сечения отверстия, а площадью кольцевого слоя на краю выходного отверстия) обеспечивали площадь выходного сечения, близкую к площади отверстия  $d_2 = 40$  мм, однако не позволяли реализовать самовоспламенение в этой

постановке. По-видимому, в последних случаях изменялась структура течения и тем самым исключалась возможность самовоспламенения. Не было самовоспламенения и в замкнутой камере (с заглушкой в отверстии  $d_2$ ).

Интересным оказался случай, когда для ввода воздуха использовалась форсунка АЗ с двумя тангенциальными входами в камеру прямо от трубопроводов. Прежними остались форсунка F2, геометрические размеры  $d_2 = 40$  мм,  $H = 15$  мм и начальные давления в ресиверах. В этом случае моделировался проточный вариант камеры сгорания. Здесь также наблюдалось самовоспламенение в установившемся режиме истечения при достижении значений  $\phi = 1.06$  и  $P_c = 32 \cdot 10^5$  Па. Удивительно, что даже в струях воздуха такого большого диаметра происходит смешение, достаточное для возникновения самовоспламенения.

Итак, для возникновения самовоспламенения водородно-воздушной смеси в данной вихревой камере необходимы давление не менее  $20 \cdot 10^5$  Па, соотношение компонентов, близкое к стехиометрии, и площадь выходного сечения камеры  $\approx 12.5$  см<sup>2</sup>. Добавим, что при этом должна сохраняться и структура течения в камере, что является главным условием воспламенения [10]. Не исключено и другое сочетание геометрических размеров плоскорадиальных вихревых камер, в которых возможен феномен самовоспламенения.

## 2.2. Иницирование

При принудительном иницировании время подрыва проволочек задавалось произвольно. Это давало возможность отыскать ту минимальную энергию, которая гарантировала бы воспламенение как в области стехиометрии, так и при других соотношениях компонентов, давлениях в камере и ее геометрии.

Предварительное тестирование пережигания медных проволочек различного диаметра длиной  $l_w = 1.5, 2$  и  $3$  мм в воздухе (вне камеры) показало, что затраченная на пережигание энергия почти не зависит от напряжения  $U$  конденсатора. С увеличением напряжения уменьшалось лишь время перегорания проволочки, а энергия пережигания  $E_i$  оставалась практически постоянной. Поэтому варьирование величины  $E_i$  возможно за счет изменения диаметра проволочки  $d_w$ , ее длины  $l_w$  и длительности импульса тока. Добавим, что значения  $U$ ,

$I$  и  $E_i$  зависят также от технологического процесса подготовки эксперимента: качества припайки проволочки на электроды, ее первоначальной целостности и разброса размеров по длине и диаметру, качества контакта подводящих проводов с электродами, поскольку электрическое сопротивление контакта соизмеримо с сопротивлением проволочки.

Опыты проводились в следующем порядке. Для каждой геометрии камеры вначале осуществлялась серия запусков без принудительного иницирования смеси. Если происходило самовоспламенение, количество опытов увеличивалось. В отсутствие самовоспламенения предпринималась попытка иницирования процесса проволочкой диаметром  $d_w = 0.07$  мм. Если энергии подрыва проволочки было недостаточно для воспламенения смеси, устанавливалась проволочка большего диаметра —  $d_w = 0.1$  мм или  $0.13$  мм. В ряде случаев энергия иницирования регулировалась длительностью времени открытия транзисторов в схеме подрыва.

Рассмотрим вначале результаты экспериментов с камерой следующей геометрии:  $d_2 = 40$  мм,  $H = 15$  мм, комплект форсунок F2/A2. Характерные осциллограммы тока и напряжения в опыте с иницированием детонации в потоке смеси проволочкой диаметром  $0.07$  мм представлены на рис. 5. Длительность импульса тока ограничена целостностью проволочки и плазменного шнура, а напряжения — временем открытия транзисторов. После разрыва токовой цепи напряжение на электродах устанавливается равным напряжению на конденсаторе —  $30$  В. В первые  $20$  мкс происходило возрастание тока до максимального значения, а напряжение повысилось всего на  $2$  В. По-видимому, за это время происходили нагревание проволочки, ее плавление и нагревание расплава до температуры кипения. При использовании проволочек диаметром  $0.1$  мм это время увеличивалось вдвое, а при диаметре  $0.13$  мм — в три раза. Примерно во столько же раз возрастала и масса проволочки, что косвенно подтверждает данное предположение. Для более толстых проволочек энергетический вклад в поток смеси увеличивается как за счет увеличения длительности первоначальной стадии нагрева (до разрушения проволочки), так и за счет более высоких значений  $U$  и  $I$  в их целостном и плазменном состоянии.

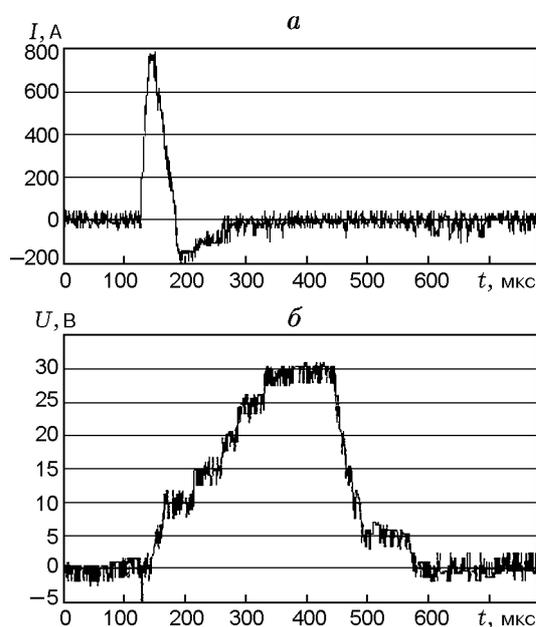


Рис. 5. Типичные осциллограммы тока (а) и напряжения (б) в процессе пережигания проволочки ( $E_i = 0.1$  Дж)

Анализ осциллограмм напряжения и тока показал, что если не уменьшать время открытия транзистора искусственно, время разряда конденсатора через плазму для всех проволочек примерно одинаково —  $40 \div 50$  мкс. В тестовых опытах, проведенных вне камеры в покоем воздухе, когда на плазменный проводник действовали только электродинамические силы контура с током и внутреннее давление плазменного шнура, время разряда по плазме было в 2–3 раза больше. Это значит, что в условиях проточной камеры существенно и воздействие газодинамических сил потока на область разряда, которые сносят плазму вниз по потоку, укорачивая и выравнивая длительность разряда всех проволочек во время их разрушения. С учетом особенностей технологии подготовки эксперимента, отмеченных выше, для проволочек диаметром  $d_w = 0.07, 0.1$  и  $0.13$  мм энергия разряда находилась в пределах  $E_i = 0.1 \div 0.2, 0.3 \div 0.6$  и  $0.6 \div 1.2$  Дж соответственно.

Вычисленная по осциллограммам рис. 5 энергия электрического разряда через проволочку диаметром  $d_w = 0.07$  мм составила  $E_i = 0.1$  Дж. Этой энергии хватало для гарантированного инициирования детонации смесей в области стехиометрии. Она намного мень-

ше энергии прямого инициирования детонации покоящейся водородно-воздушной смеси, которая при давлении  $10^5$  Па в трехмерной области составляет  $4.6 \div 6.6$  кДж, а при давлении  $30 \cdot 10^5$  Па в пересчете на двумерную область может быть снижена до  $1.4 \div 1.75$  Дж [14]. Ее величина меньше, чем энергия разряда автомобильной свечи ( $>0.12$  Дж [15]), которая инициирует в камере двигателя внутреннего сгорания лишь процесс турбулентного горения. Для демонстрации этого утверждения был проведен ряд опытов по инициированию воспламенения автомобильной свечей по стандартной схеме от источника постоянного тока с напряжением 12 В через автомобильную катушку зажигания. Детонация инициировалась даже при худших условиях в камере:  $d_2 = 70$  мм и  $H = 5$  мм.

Оценим энергетический вклад в разрушение проволочки ( $E_f$ ) на этапах нагрева ( $E_h$ ), плавления ( $E_{melt}$ ), нагрева расплавленного состояния ( $E_{m,b}$ ) и кипения ( $E_b$ ) проволочки:

$$E_f = E_h + E_{melt} + E_{m,b} + E_b = cm(T_{melt} - T_0) + mh + c_{m,b}m(T_b - T_{melt}) + mL_b,$$

где  $c = 0.385$  кДж/(кг·К) и  $c_{m,b} = 0.49$  кДж/(кг·К) — теплоемкость твердой и расплавленной меди;  $m = \pi d_w^2 l_w \rho_{Cu} / 4$  — масса проволочки;  $T_{melt} = 1356$  К и  $T_b = 2890$  К — температура плавления и кипения меди,  $T_0 = 293$  К — начальная температура;  $h = 205$  кДж/кг и  $L_b = 4.8 \cdot 10^3$  кДж/кг — удельная теплота плавления и кипения меди;  $\rho_{Cu} = 8930$  кг/м<sup>3</sup> — плотность меди. Для проволочки длиной  $l_w = 2$  мм и диаметром  $d_w = 0.07$  мм соответствующие энергии равны  $E_h = 0.016$  Дж,  $E_{melt} = 0.006$  Дж,  $E_{m,b} = 0.02$  Дж и  $E_b = 0.134$  Дж, а суммарная энергия  $E_f = 0.176$  Дж. Для проволочек диаметром  $d_w = 0.1$  и  $0.13$  мм суммарная энергия увеличивается пропорционально массе примерно в 2 и 3 раза соответственно. Из этой оценки видно, что в данном случае проволочка диаметром  $d_w = 0.07$  мм испарилась частично и в поток смеси кроме ионизированных атомов меди попадали также капли расплавленного металла.

Оценим энергетический вклад от проволочки в поток до ее разрушения. Количество тепла, передаваемого в поток цилиндрической проволочкой без учета растекания тепла на электроды, определяется соотношением  $\Delta q_w = \alpha S_w \Delta T \Delta t$ , где  $\alpha = Nu \lambda / d_w$  — коэффициент

теплоотдачи,  $Nu = 0.18Re^{0.62}Pr^{0.33}$  — число Нуссельта при обтекании цилиндрического тела, расположенного перпендикулярно потоку [16],  $Re = vd_w/\nu$  — число Рейнольдса,  $v$  — скорость потока,  $\nu$  — кинематическая вязкость воздуха,  $Pr$  — число Прандтля,  $S_w = \pi d_w l_w$  — площадь поверхности проволоочки,  $\Delta T$  — разность температур проволоочки и потока газа в ее окрестности,  $\Delta t$  — время нагрева проволоочки,  $\lambda$  — теплопроводность воздуха. Принимая  $d_w = 0.1$  мм,  $\lambda = 2.6 \cdot 10^{-2}$  Дж/(м·с·К),  $\nu = 15.1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $v = 200$  м/с [9],  $\Delta T = 1.5 \cdot 10^3$  К (средняя температура начала нагрева до испарения меди),  $\Delta t = 40 \cdot 10^{-6}$  с,  $Pr \approx 1$ , получаем, что  $\Delta q_w = 0.15 \cdot 10^{-3}$  Дж. Излучение проволоочки можно оценить по известной формуле  $\Delta q_r = \sigma \varepsilon S_w T_w^4 \Delta t$ , где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12}$  Дж/(см<sup>2</sup>·с·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon$  — коэффициент интегрального излучения, принятый равным единице для поверхности абсолютно черного тела;  $T_w$  — температура поверхности проволоочки. Даже в расплавленном состоянии меди потери тепла проволоочки на теплопередачу к газу и излучение получают на два порядка меньше, чем при конвективном охлаждении. Сравнивая полученные значения  $\Delta q_w$  и  $\Delta q_r$  с величинами  $E_f$ , видим, что теплоотдачей в поток смеси до разрушения проволоочки можно пренебречь. Таким образом, подвод энергии в поток смеси в основном осуществляется при разряде конденсатора по ионизированному состоянию меди. При этом электронная проводимость меди по мере ее испарения заменяется ионной проводимостью с возрастанием напряжения на электродах. За время протекания тока по плазменному состоянию меди (40 мкс) смесь, движущаяся со скоростью  $v \approx 200$  м/с, переместится на расстояние  $l_v \approx 12$  мм. Эту узкую область в следе за проволоочкой можно считать зоной тепловыделения, так как газовая фаза и капли металла размером в несколько микрометров при данных условиях в камере приобретают скорость окружающего потока практически мгновенно [8].

На рис. 6 приведена фоторегистрограмма, полученная в эксперименте, когда электроды установлены непосредственно в окне камеры с  $d_2 = 70$  мм и  $H = 10$  мм. Электроды закрывают часть окна и на развертке прорисовывают узкую полосу. Центральное круглое окно в данной постановке закрыто. Видно, что очаг инициирования сносится потоком газа, скорость которого в этот момент около 200 м/с. Свечение в окнах появляется через 0.2 мс почти

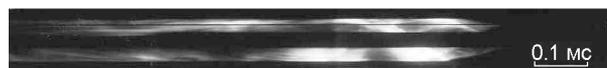


Рис. 6. Типичная фоторегистрограмма принудительного инициирования детонации водородно-воздушной смеси:

центральное окно закрыто; комбинация форсунок F2/A2,  $d_2 = 70$  мм,  $H = 10$  мм, на момент инициирования (яркая вспышка впереди развертки)  $P_c = 17 \cdot 10^5$  Па в точке  $R_c = 70$  мм,  $\phi = 1.2$ ,  $E_i = 0.33$  Дж

одновременно в верхнем (в области электродов) и в нижнем окне (вблизи выходного отверстия камеры). Фазовая скорость перемещения фронта свечения вдоль окон составляет  $\approx 550$  м/с, причем область свечения в верхнем окне движется как вверх, так и вниз по потоку. Отражение от зоны выхода потока из камеры сразу генерирует более сильную детонационную волну, распространяющуюся со скоростью 1170 м/с вверх по потоку частично сгоревшего газа за предыдущей слабой волной. Слабая детонационная волна во втором окне, отразившись от цилиндрической стенки, генерирует детонационную волну, движущуюся уже вниз по потоку частично выгоревшего газа со скоростью 1700 м/с. Через 1 мс после взаимодействия этих волн, вырождающихся затем в ударные с очагами продуктов и свежей смеси, устанавливается устойчивая непрерывная спиновая детонация с двумя поперечными детонационными волнами, движущимися со скоростью  $D = 1830$  м/с относительно цилиндрической стенки камеры. При принудительном инициировании детонации время ее установления увеличивалось до 0.3 мс. Это находит вполне логичное объяснение: смесь менее подготовлена по сравнению со случаем самовоспламенения.

Из рис. 2 видно, что при запаздывании подачи воздуха относительно подачи водорода в коллектор воздуха со стороны камеры через форсунки натекает водород до давления  $(2.5 \div 5) \cdot 10^5$  Па. Если инициирование детонации начиналось очень рано (в первые миллисекунды истечения воздуха), возникала возможность инициирования малой энергией (0.18 Дж) при малых давлениях ( $3 \cdot 10^5$  Па). Этот случай имел место в камере с  $d_2 = 70$  мм и  $H = 5$  мм, несмотря на то, что пограничные слои на плоских стенках практически смыкались [9]. По видимому, имело место предварительное сме-

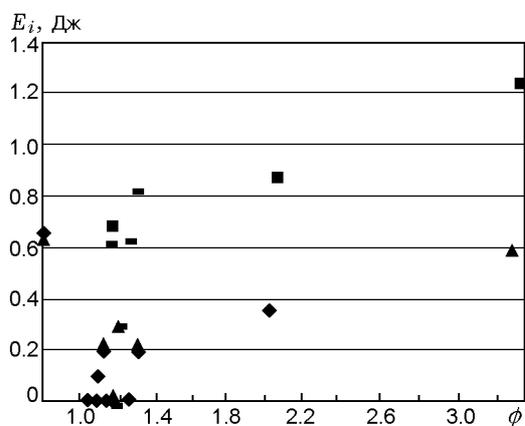


Рис. 7. Зависимость энергии иницирования от соотношения компонентов в камерах различной геометрии:

◆ —  $d_2 = 40$  мм, ▲ —  $d_2 = 50$  мм,  $d_3 = 30$  мм, — —  $d_2 = 70$  мм, ■ —  $d_2 = 0$  (замкнутая камера), комбинация форсунок F2/A2,  $H = 15$  мм

шение водорода с воздухом в коллекторе воздуха, что улучшало условия иницирования. Однако случаев самовоспламенения в камере этой геометрии не наблюдалось.

На рис. 7 приведена зависимость энергии иницирования детонации  $E_i$  от соотношения компонентов водородно-воздушной смеси в камерах различной геометрии. Здесь же показаны точки, соответствующие самовоспламенению ( $E_i = 0$ ) в диапазоне давлений в камере  $(20 \div 44) \cdot 10^5$  Па. Строго говоря, значения  $E_i$  не соответствуют минимально необходимой энергии иницирования смеси ввиду разброса энергии подрыва проволочек, но гарантируют иницирование детонации. Мы ограничились приведенными значениями  $E_i$ , так как поиск точных значений минимальной энергии иницирования смеси повысил бы на порядок объем работы, что, по нашему мнению, на данном этапе изучения процесса иницирования детонации неоправданно.

Как и следовало ожидать, наименьшая энергия иницирования детонации требуется для камеры с  $d_2 = 40$  мм и  $H = 15$  мм как вблизи, так и при отклонении от стехиометрического состава смеси. При  $\phi < 1$  энергия иницирования детонации резко возрастает. Обогащение смеси горючим способствует ее воспламенению, а в области  $\phi = 1.06 \div 1.28$  возможно и самовоспламенение. Надежное иницирование детонации обеспечивается энергией  $E_i = 0.1$  Дж. Переобогащение в два раза

( $\phi = 2$ ) примерно в четыре раза увеличивает энергию уверенного иницирования детонации. Близки энергии иницирования для камеры с  $d_2 = 50$  мм,  $H = 15$  мм и с вставкой диаметром  $d_3 = 30$  мм. Как уже отмечалось ранее, в такой камере возможно и самовоспламенение топливной смеси. Увеличение выходного сечения камеры до  $d_2 = 70$  мм ( $H = 15$  мм) поднимает энергию иницирования в области стехиометрии в  $4 \div 6$  раз. Уменьшение расстояния между стенками в 1.5 раза ( $H = 10$  мм) сокращает разрыв в два раза, а при  $H = 5$  мм — в три раза (две нижние точки на рис. 7:  $E_i = 0.3$  и  $0.18$  Дж соответственно). В камере с  $d_2 = 100$  мм и  $H = 15$  мм при иницировании и детонации по схеме, изображенной на рис. 3, не удалось иницировать воспламенение смеси. Детонация возбудилась лишь в области стехиометрии непосредственно от источника с напряжением 36 В без ограничения тока, текущего по проволочке. По результатам опытов [8] энергия иницирования детонации в этом случае оценивается в 2.5 Дж. Сравнительно велика энергия иницирования детонации и в замкнутой камере (без выходного отверстия). В области стехиометрического состава смеси она близка к случаю с  $d_2 = 70$  мм и  $H = 15$  мм. Режим с недостатком горючего в этой камере не реализовывался. Характер роста энергии иницирования детонации в сторону обогащения горючим аналогичен рассмотренным выше случаям.

После воспламенения и переходного процесса, сопровождающегося взаимодействием отраженных от цилиндрической стенки детонационных и ударных волн и продолжающегося около 1 мс, в камере развивалась или непрерывная спиновая детонация, или турбулентное горение с околосзвуковыми вращающимися и радиальными волнами. Структура спиновых волн подробно рассмотрена в работах [7, 17]. С увеличением диаметра выходного отверстия возрастает возможность реализации спинового детонационного режима и наоборот. В камере с  $d_2 = 100$  мм и  $H = 15$  мм реализовался процесс с двумя волнами, движущимися со скоростью  $D = 1780$  м/с относительно наружного диаметра камеры. Спиновый детонационный режим наблюдался и в камере с  $d_2 = 50$  мм,  $H = 15$  мм [7], но в камере с  $d_2 = 40$  мм, а также в замкнутой камере детонационные режимы не реализовывались. Здесь преобладало обычное турбулентное горение. Этот результат полностью согласуется с данными рабо-

ты [17], когда в камере диаметром 80 мм и  $H = 5$  мм на топливно-кислородных смесях реализовывалась аналогичная ситуация. Причина этого очевидна: повышение давления в камере, вызванное уменьшением оттока продуктов, быстро переводит истечение топливных компонентов из форсунок в дозвуковую область и препятствует натеканию свежей смеси. Вследствие этого образование детонационноспособного слоя смеси становится невозможным. Однако не исключено, что при высоких перепадах давления на форсунках, когда топливные компоненты подаются в камеру со скоростью звука, влияние детонационных волн на систему подачи будет ограничено узкой областью повышенного давления за фронтом волны. В этом случае возможны образование детонационноспособного слоя смеси и реализация непрерывной спиновой детонации.

С возникновением воспламенения и развитием процесса горения, детонационного или обычного турбулентного, давление в камере на периферии становилось меньше, а на краю отверстия — больше, чем при истечении холодных продуктов. Этот результат подтверждает ранее проведенные опыты и расчеты по модели течения в потенциальном вихре [7]. Причина состоит в том, что продукты горения, плотность которых меньше плотности исходной смеси, создают меньшие центробежные силы. А вращающаяся область высокого давления за фронтом детонационной волны невелика — не более  $10 \div 20$  % периода между волнами. В настоящей работе удалось измерить давление вдоль радиуса камеры. На рис. 8 представлены кривые, иллюстрирующие это явление. Для того чтобы не загромождать рисунок, из восьми осциллограмм приведены только две граничные: в точке  $R_c = 98$  мм (на расстоянии 4 мм от цилиндрической поверхности) и в точке  $R_c = 40$  мм (на расстоянии 5 мм от края отверстия). Осциллограммы, полученные в промежуточных точках, лежат между ними. По мере затухания детонации, обусловленного уменьшением расхода, соответствующие кривые сближаются.

## ВЫВОДЫ

1. Впервые в управляемом режиме раздельной подачи топлива водород — воздух в плоскорадиальную вихревую камеру осуществлены режимы самовоспламенения образующейся

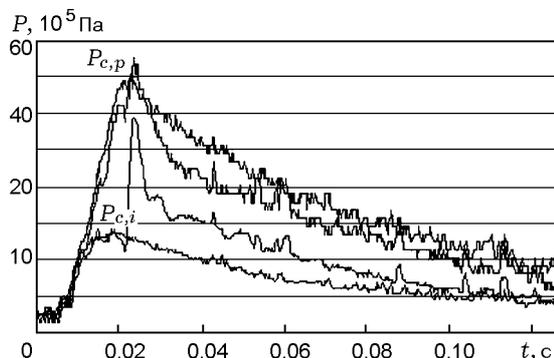


Рис. 8. Изменение во времени давления в камере на периферии ( $P_{c,p}$ ) и на краю выходного отверстия ( $P_{c,i}$ ) при истечении холодных топливных компонентов (крайние кривые) и детонации (внутренние кривые) при одних и тех же условиях подачи:

начало возникновения детонации отмечено резким подъемом давления в камере;  $d_2 = 70$  мм,  $H = 15$  мм

ся топливной смеси с быстрым (0,2 мс) переходом в детонацию. Найдены условия самовоспламенения, главными из которых являются структура течения и соотношение топливных компонентов. Самовоспламенение возникает в области стехиометрии с небольшим (до  $6 \div 30$  %) обогащением смеси водородом и, как правило, в дозвуковом потоке.

2. Путем измерения тока в проволочке и напряжения на ней во время подрыва определены энергии гарантированного инициирования детонации водородно-воздушной смеси в вихревой плоскорадиальной камере различной геометрии с различным соотношением топливных компонентов. Минимальные значения энергии лежат в области стехиометрии смеси с небольшим избытком водорода (соответствуют условию самовоспламенения). Отклонение соотношения компонентов от этой области в ту или другую сторону повышает энергию инициирования, причем более резко при обеднении смеси водородом.

3. В условиях данной установки определена оптимальная геометрия камеры и система подачи, для которых в каждом втором опыте наблюдалось самовоспламенение, а для гарантированного инициирования детонации в области стехиометрии необходима энергия разряда около 0,1 Дж.

4. Выяснено, что основной вклад энергии в поток смеси происходит на стадии испарения (ионизации) меди пережигаемой проволочки.

5. Для топливно-воздушной смеси при неизменной системе подачи обнаружено затухание непрерывного спиновое детонационного режима при уменьшении выходного сечения камеры. В полностью заглушенной камере реализуется только турбулентное горение. В режиме горения, как детонационного, так и обычного турбулентного, давление на периферии вихревой плоскорадиальной камеры уменьшается, а у выхода из отверстия увеличивается по сравнению с режимом истечения холодных топливных компонентов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Келли Дж.** После сгорания — детонация // Что нового в науке и технике. 2003. № 11 (13). С. 98–108.
2. **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.
3. **Левин В. А., Марков В. В., Журавская Т. А., Осинкин С. Ф.** Иницирование детонации в газообразной смеси воздуха с углеводородным топливом электрическим разрядом // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике, Новосибирск, Россия, 27–31 мая 2005: Тез. докл. С. 154.
4. **Vasil'ev A. A.** Optimization of DDT accelerators // Advances in Confined Detonations / G. Rou, S. Frolov, R. J. Santoro, S. A. Tsyganov (Eds). Moscow: Torus Press Ltd, 2002. P. 31–35.
5. **Frolov S. M., Basevich V. Ya., Aksenov V. S.** Combustion chamber with intermittent generation and amplification of propagating reactive shocks // Application of Detonation to Propulsion / G. D. Rou, S. M. Frolov, J. Shepherd (Eds). Moscow: Torus Press Ltd, 2004. P. 240–249.
6. **Фролов С. М.** Макет-демонстратор воздушно-реактивного импульсного детонационного двигателя на жидком топливе // II Междунар. науч.-техн. конф. «Авиадвигатели XXI века», Москва, 06–09.12.2005: Сб. тез. Т. I. С. 208–210.
7. **Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф.** Непрерывное детонационное сжигание топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 3. С. 120–131.
8. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 1. Экспериментальное исследование поля скоростей в переходном и стационарном режимах // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 6. С. 112–121.
9. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 2. Вихревая структура течения // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 1. С. 41–49.
10. **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.
11. **Баев В. К., Головичев В. И., Третьяков П. К.** Горение в сверхзвуковом потоке. Новосибирск: Наука, 1984.
12. **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.
13. **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.
14. **Васильев А. А., Митрофанов В. В., Топчий М. Е.** Детонационные волны в газах // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 109–131.
15. **Литке Э.** Электронная система зажигания // В помощь радиолюбителю: Сб. ст. М.: Изд-во ДОСААФ СССР, 1982. Вып. 76. С. 69–78.
16. **Данилова Г. Н., Филаткин В. Н., Черная Р. Г., Щербов М. Г.** Сборник задач и расчетов по теплопередаче. М.: Изд-во торговой лит., 1961.
17. **Быковский Ф. А., Васильев А. А., Ведерников Е. Ф., Митрофанов В. В.** Детонационное горение газовой смеси в радиальных кольцевых камерах // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 4. С. 111–118.

Поступила в редакцию 7/II 2006 г.