

УДК 534.222.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ПЕРЕОБОГАЩЕННЫХ СМЕСЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ С КИСЛОРОДОМ

И. С. Батраев, А. А. Васильев, В. Ю. Ульяницкий, А. А. Штерцер,
Д. К. Рыбин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, asterzer@mail.ru

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование детонации смесей ацетилен, этилена и пропилена с кислородом в области концентраций топливного компонента, когда возможно выделение углеродного конденсата в продуктах. В отличие от традиционного способа исследования детонации в закрытой трубе и покоящейся смеси, в данной работе исследования выполнены в трубе с открытым торцом (для истекающих продуктов детонации) в условиях раздельной подачи компонентов смеси и их перемешивания при проточной подаче в детонационную трубу через камеру зажигания. Для запуска смеси в трубу использована многоканальная система газопитания установки детонационного напыления CCDS2000 с компьютерным управлением. Измерены размеры ячеек и скорости детонации, проведены расчеты этих параметров с использованием компьютерной программы «Безопасность». Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей свидетельствует о сложном характере трансформации продуктов детонации из чисто газового состояния в гетерогенное и его обратном влиянии на детонационную волну.

Ключевые слова: детонация, импульсный газодетонационный аппарат, переобогащенная смесь, продукты реакции, углеродный конденсат, гомогенная и гетерогенная среда, размер ячейки.

DOI 10.15372/FGV20180210

ВВЕДЕНИЕ

Конденсация углерода в продуктах горения углеводородов (например, образование сажи) хорошо известна и широко исследована, однако этот процесс практически не изучен применительно к режимам детонации смесей углеводородов с кислородом. Состояние исследований в этой области, основные результаты и задачи проанализированы и обобщены в [1]. Отметим, что эксперименты по изучению конденсации углерода при детонации, как правило, проводят с предварительно приготовленными в стационарных условиях смесями газовых углеводородных топлив с кислородом [2–4]. Для получения высокой однородности смеси компоненты смешивают в специальном резервуаре, обычно в течение десятков минут, после чего приготовленную смесь подают в предварительно вакуумированную экспериментальную камеру, в которой возбуждается детонация и регистрируются параметры процесса. Такие условия не всегда можно реализовать в производственных условиях, в частности, при реализации промышленных технологий в импульс-

ных газодетонационных аппаратах (ИГДА), где смешение происходит в процессе проточной подачи компонентов смеси в рабочую камеру. При этом требуется добиться хорошего перемешивания за несколько миллисекунд.

ИГДА получают всё более широкое распространение: это и установки детонационного напыления [5–8], и импульсный детонационный двигатель [9, 10], и возможность автоматизированной генерации углеродного конденсата [11], поэтому изучение детонации в газовых зарядах, формируемых при проточной подаче компонентов взрывчатой смеси, представляет несомненный интерес.

В теоретическом плане возникает задача математического описания детонации в условиях трансформации чисто газовых продуктов в гетерогенную среду, когда часть углерода переходит в твердую фазу. При этом уравнение состояния для газовых продуктов требует корректировки за счет гетерогенного компонента. Изучение особенностей детонационных волн в условиях переменности уравнения состояния представляет собой интересную и актуальную задачу как для теоретиков, так и для экспериментаторов.

Настоящая работа посвящена исследованию детонации переобогащенных топливокислородных смесей применительно к генерации наноразмерного углеродного конденсата в режиме газовой детонации, впервые реализованной в ИГДА [12]. Благодаря наличию слабой тройной межуглеродной связи, наибольшей реакционной способностью к детонационному разложению с образованием углеродного конденсата обладают алифатические углеводороды из гомологического ряда алкинов, в частности ацетилен, что позволило осуществить его детонационное разложение в малогабаритной камере — стволе диаметром 26 мм и длиной 1 м [12, 13]. Потенциально пригодными для получения наноразмерного углеродного конденсата могут быть и алифатические углеводороды из ряда алкенов — этилен и пропилен, имеющие относительно слабую двойную межуглеродную связь, а их смеси с кислородом также могут детонировать при отрицательном кислородном балансе. Для указанных топлив в данной работе приведены результаты исследований детонационных волн, в том числе в условиях, обеспечивающих конденсацию углерода.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Конденсация углерода в продуктах детонации сопровождается выделением дополнительной энергии при фазовом переходе из газового состояния в конденсированное, что должно влиять на скорость детонации, а следовательно, и на характерный размер ячейки многофронтной детонации. Очевидно, что такое влияние может быть обнаружено в экспериментах.

Использовалась традиционная методика регистрации ячеистой структуры на закопченной поверхности с формированием слоя сажи модифицированным методом (подробности ниже). Скорость детонации определялась традиционно — по времени прохождения детонационной волны между датчиками, установленными на фиксированном расстоянии друг от друга.

В экспериментах применялась система импульсного газопитания, разработанная в ИГиЛ СО РАН для установки детонационного напыления CCDS2000 [8, 14, 15]. Особенности ее работы излагаются ниже. Дополнительным аргументом в пользу этой установки является возможность работать с переобогащенными смесями, что открывает перспективы использова-

ния установки для получения, например, наноразмерного углерода (предварительные исследования подтвердили подобную возможность, см., например, [11–13]).

В качестве горючих смесей выбраны топливокислородные композиции на основе ацетилена, этилена и пропилена.

Упомянутая выше система газопитания промышленного комплекса детонационного напыления CCDS2000 с компьютерным управлением позволяет вести тщательный контроль расхода газов и тем самым выдерживать заданное соотношение между топливом и окислителем при проточной подаче газовых компонентов в реакционную камеру. Кроме специального устройства для интенсификации смешения газовых компонентов и возбуждения детонации [14], система газопитания CCDS2000 имеет также устройство, обеспечивающее прецизионную стабилизацию расходных характеристик по каждому газовому компоненту, основанное на звуковом истечении газа из ресивера через малое отверстие (жиклер).

Устройство работает следующим образом (рис. 1). Каждый компонент смеси подается в ствол через приемную полость 1 своего пневматического стабилизатора, действующего по принципу газового редуктора, в котором давление на выходе определяется опорным давлением $p_{оп}$ в полости 2, задаваемым управляющим редуктором 3, а выходная полость 4 является ресивером, из которого газ через калиброванное отверстие жиклера 5 поступает в детонационную установку при открытии клапана 6. В полости 2 поддерживается избыточное давление более 0.11 МПа, что при открытом клапане обеспечивает звуковое истечение исполь-

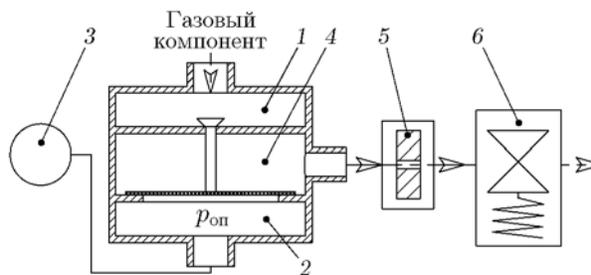


Рис. 1. Устройство для стабилизации расхода газа (пневматический стабилизатор давления):

1 — приемная полость, 2 — полость с постоянным давлением газа (опорное давление $p_{оп}$), 3 — управляющий редуктор, 4 — выходная полость, 5 — жиклер, 6 — выпускной клапан

зуемых газов через жиклер. Опорные полости 2 всех стабилизаторов объединены, благодаря чему все компоненты смеси подаются на свои жиклеры с одинаковым давлением.

Объемный расход газа через жиклер пропорционален площади его сечения S и рассчитывается для некоторого произвольного газового компонента по формуле

$$Q_v = K d^2, \quad (1)$$

где d — диаметр жиклера, K — индивидуальный расходный коэффициент, зависящий от свойств газа, от стабилизированного давления p_0 и, строго говоря, от температуры газа в стабилизаторе давления (ресивере) T_0 . Если расходные коэффициенты для воздуха или, например, азота можно определить, измерив расход в магистрали с помощью стандартного расходомера, то для топливных газовых компонентов градуировки в расходомерах обычно не приводятся. Для определения соответствующих расходных коэффициентов ацетилена, этилена, пропилена и кислорода использовалась формула из [16] для расчета массового расхода при истечении газа из ресивера высокого давления через малое отверстие сечением S :

$$Q_m = \rho_0 c_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/[2(\gamma-1)]} S, \quad (2)$$

где γ — показатель адиабаты соответствующего газа, ρ_0 и c_0 — соответственно плотность и скорость звука газа в ресивере (стабилизаторе давления). Из (2) можно получить формулу для объемного расхода, приведенного к плотности газа ρ_n при нормальных условиях ($p_n = 0.1013$ МПа, $T_n = 293.15$ К):

$$Q_v = c_n \frac{p_0}{p_n} \sqrt{\frac{T_n}{T_0}} f(\gamma) S, \quad (3)$$

где c — скорость звука в газе, p , T — давление и температура газа соответственно. Индексы 0 и n относятся соответственно к параметрам газа в ресивере и в нормальных условиях. Функция $f(\gamma)$ описывается формулой

$$f(\gamma) = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/[2(\gamma-1)]}. \quad (4)$$

Поскольку $S = \pi d^2/4$, то для вычисления расходного коэффициента из (3) получаем формулу

$$K = c_n \frac{p_0}{p_n} \sqrt{\frac{T_n}{T_0}} \frac{\pi}{4} f(\gamma). \quad (5)$$

Если нет справочных данных, скорость звука при нормальных условиях рассчитывается по известной формуле

$$c_n = \sqrt{\frac{\gamma p_n}{\rho_n}} = \sqrt{\frac{\gamma R T_n}{\mu}}, \quad (6)$$

где R — универсальная газовая постоянная, μ — молярная масса газа. Для расчета γ использовались данные по теплоемкости газов, взятые из [17].

Для экспериментальной проверки расчетных значений расхода воздуха, кислорода, аргона и пропана через жиклеры применялся расходомер Bronkhorst, на котором имеются шкалы для указанных газов. Проверка показала, что расхождение расчетных (по формуле (5)) и экспериментальных значений не превышает 5 %, поэтому формулы (1), (5) можно использовать для подбора режимов подачи газовых компонентов при работе на ИГДА.

Из (5) очевидно, что отношение расходных коэффициентов двух газов 1 и 2 не зависит от давления и температуры газов в ресивере и выражается формулой

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{c_{n2} f(\gamma_2)}{c_{n1} f(\gamma_1)}. \quad (7)$$

Поэтому даже при изменении p_0 и T_0 выбранные жиклеры обеспечивают постоянство пропорций газовых компонентов в смеси.

В табл. 1 приведены некоторые параметры и расходные коэффициенты ряда газов, которые можно использовать при работе на ИГДА.

Отметим, что управляющие электромагнитные клапаны установки CCDS2000 имеют проходное сечение диаметром 4 мм, и при диаметре используемых в системе газопитания жиклеров не более 2 мм пневмосопротивление клапанов пренебрежимо мало, что гарантирует звуковое истечение газов через жиклер.

Схема эксперимента по регистрации детонации представлена на рис. 2. К газораспределителю 1 с камерой смешения — зажигания 2 от установки CCDS2000 присоединялся экспериментальный составной ствол диаметром 26 мм и длиной 2000 мм с двумя секциями 3 и 4 длиной по 150 мм, в которых устанавливалась фольга 5 для фиксации следовых отпечатков структуры фронта детонационной волны. Первая секция 3 примыкала к

Таблица 1

Параметры газов и расходные коэффициенты

Газ	μ , г/моль	ρ_n , кг/м ³	γ	c_n , м/с	K , см ³ /(мс·мм ²)
Воздух	28.960	1.1887	1.40	345	0.3375
Кислород	32.000	1.3137	1.40	326	0.3186
Азот	28.016	1.1497	1.40	349	0.3411
Аргон	39.944	1.6399	1.66	319	0.3029
Гелий	4.003	0.1641	1.67	1 014	0.9633
Водород	2.016	0.0827	1.40	1 304	1.2736
Ацетилен	26.036	1.0761	1.23	341	0.3393
Этилен	28.052	1.1578	1.25	330	0.3284
Пропилен	42.078	1.7491	1.15	258	0.2594
Пропан	44.094	1.8382	1.13	249	0.2515
Бутан	58.120	2.4157	1.09	214	0.2169
МАФ	40.929	1.7011	1.15	261	0.2629

Примечания. Значения коэффициента K соответствуют стабилизированному избыточному давлению в ресивере $p_0 - p_n = 0.115$ МПа, устанавливаемому в промышленных установках CCDS2000, и комнатной температуре (20 °С). Состав газа МАФ соответствует композиции из метилацетилена, аллена, пропана и пропилена $5C_3H_4 + C_3H_8 + C_3H_6$.

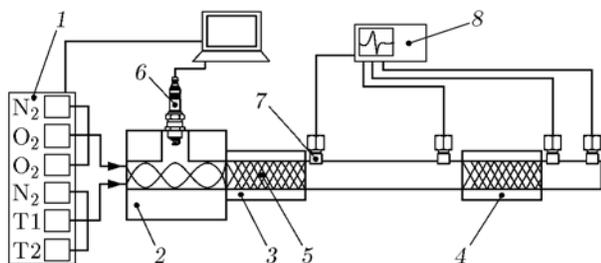


Рис. 2. Схема экспериментального стенда с системой газоподдачи от комплекса CCDS2000:

1 — газораспределитель, 2 — камера смешения — зажигания, 3, 4 — секции для установки фольги, 5 — фольга, 6 — автомобильная свеча, 7 — пьезодатчик давления (4 шт.), 8 — осциллограф, T1 и T2 — топливные каналы, O₂ и N₂ — каналы подачи кислорода, азота или других нетопливных газов

камере зажигания, а вторая 4 находилась на расстоянии 950 мм от среза ствола. Детонация возбуждалась электрическим разрядом от автомобильной свечи зажигания 6. Прохождение фронта детонационной волны регистрировалось четырьмя пьезодатчиками давления 7, установленными на расстоянии 270, 1 120, 1 370 и 2 020 мм от места инициирования. Сигнал от датчиков записывался четырехканальным ос-

циллографом Tektronix TDS 2004B 8. Обработка осциллограмм давала возможность измерения скорости детонационной волны с осреднением на шести интервалах. Погрешность измерения скорости детонации определялась точностью расположения чувствительных элементов (пьезодатчиков), которая составляла ± 2 мм. Таким образом, погрешность измерения скорости на указанных интервалах не превышала 2 %.

Поступавшие из газораспределителя газовые компоненты в результате 4-кратного столкновения встречных струй сечением около 1 см² смешивались в камере 2, и полученная смесь поступала в ствол. Иницирование детонации производилось внутри камеры 2.

Описанная система газопитания CCDS2000 с двухканальной подачей компонентов взрывчатой смеси дает возможность формирования стратифицированного заряда с переменным составом по длине ствола путем закрытия и открытия соответствующих клапанов по заданной программе — циклограмме при подаче взрывчатой смеси в ствол установки. В частности, при исследовании подаваемой в ствол относительно трудно детонирующей смеси камеру зажигания и начальный участок

ствола можно заполнить более активной смесью того же или даже другого более активного топлива, например ацетилена. Такая схема, наряду с оригинальной конструкцией камеры зажигания, обеспечивает надежное возбуждение детонации в стволе вплоть до предельных режимов — спиновой детонации.

Ячеистая структура фронта детонации регистрировалась по классической методике следовых отпечатков на закопченной фольге (рис. 3). При этом применялся модифицированный метод получения слоя сажи: алюминиевая фольга толщиной 250 мкм покрывалась из спрей-баллона тонким слоем алкидного красителя, который после высыхания отжигался в пламени газовой горелки до получения прочного слоя сажи. Такая методика обеспечивала более стойкий слой сажи в сравнении с традиционным копчением в факеле масляной горелки, что оказалось решающим для регистрации следов детонационного фронта в условиях интенсивного выделения углеродного конденсата при детонации сильно переобогащенной смеси.

Заряд взрывчатой смеси в стволе формировался по программе переключения управляющих клапанов газораспределителя CCDS2000, задаваемой циклограммой на компьютере блока управления CCDS2000 [18].

Характерное время наполнения ствола взрывчатой смесью было порядка $300 \div 400$ мс при времени срабатывания управляющих клапанов (FESTO MHP4-MS1H-3/2G-QS-8)

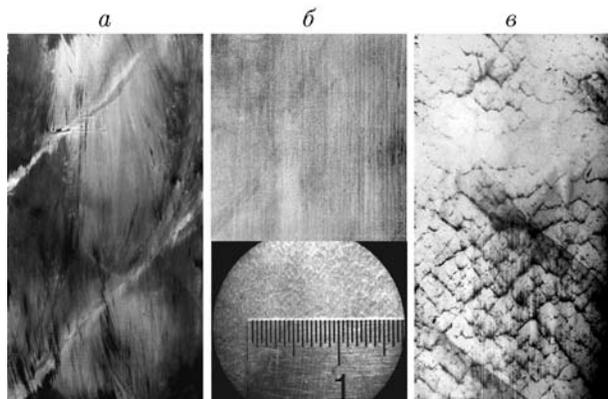


Рис. 3. Следовые отпечатки, полученные при различных концентрационных соотношениях компонентов в смесях ацетилена, этилена и пропилена с кислородом:

a — $10C_2H_2 + O_2$; b — $C_2H_4 + O_2$; v — $C_3H_6 + 1.5O_2$

$3 \div 4$ мс, что позволяло создавать до 95 % объема заряда однородной смеси. При таком времени заполнения смесь движется по стволу со скоростью ≈ 10 м/с, а в каналах смесителя (с сечением около 1 см^2) скорость газов достигает 50 м/с.

Для прямого инициирования стационарной детонации смесями ацетилена и этилена при пограничном по выделению углерода составе было достаточно энергии стандартного источника зажигания CCDS2000 (≈ 10 мДж). Иницирование же детонации в более богатых смесях этих топлив, а также пропилена, начиная с пограничного состава, было реализовано с применением форсажа за счет формирования стратифицированного заряда, при котором вначале в ствол подается исследуемая смесь, а в завершение камера зажигания и прилегающий к ней участок ствола заполняются активной (легко детонирующей) смесью.

Размеры ячеек измерялись при 17 концентрационных соотношениях для ацетилена и 4 для этилена и пропилена. Для каждого соотношения проводилось по пять опытов и вычислялось среднее значение скорости детонации. Поперечный размер ячейки a вычислялся по количеству следовых линий одного направления, пересекающих поперечную линию на отпечатке.

Результаты экспериментов для смесей ацетилена, этилена и пропилена с кислородом представлены в табл. 2 и на рис. 4–6.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ

Параметры детонации рассчитывались с помощью компьютерной программы «Безопасность» в рамках модели термодинамического и химического равновесия всех компонентов, участвующих в реакции. Рассмотрены два варианта: а) углерод остается в газовой фазе; б) углерод переходит в конденсированное состояние в соответствии с законами равновесия фаз. Подробности работы программы «Безопасность» и ее возможности изложены в [19]. Результаты расчетов приведены на рис. 4–6. На этих же рисунках представлены экспериментальные результаты, полученные в данной работе, а также в работах [1, 20–23]. Сплошная линия на рисунках после точки разветвления кривых соответствует присутствию в продуктах детонации конденсированного углерода, штриховая — расчетам, в которых весь углерод рассматривается как газообразный. Из

Таблица 2
Данные экспериментов
для топливокислородных смесей

O/C	D, м/с	a, мм
Ацетиленкислородные смеси		
0.97	2889	0.07
0.91	2782	0.10
0.81	2711	0.13
0.68	2541	0.32
0.57	2386	0.41
0.50	2301	1.70
0.45	2241	2.40
0.42	2144	3.50
0.38	2144	6.30
0.30	2158	6.70
0.26	2167	9.10
0.23	2119	11.7
0.20	2032	13.0
0.18	2003	31
0.17	1988	42
0.12	1871	81 (спин)
0.11	1871	81 (спин)
Этиленкислородные смеси		
1.02	2626	0.37
0.87	2416	5.78
0.78	2265	17
0.68	2034	81 (спин)
Пропиленкислородные смеси		
0.99	2438	6.7
0.92	2328	13
0.79	2058	64
0.74	1949	81 (спин)

рисунков хорошо видно, что конденсация углерода законами равновесия допускается начиная с молярной концентрации топлива C^* . Для ацетилена $C^* \approx 0.6$, для этилена $C^* \approx 0.5$; для пропилена в литературе недостаточно данных о кинетических параметрах реакций, поэтому на рис. 6 отсутствует разветвление расчетных кривых на штриховую и непрерывную ветви,

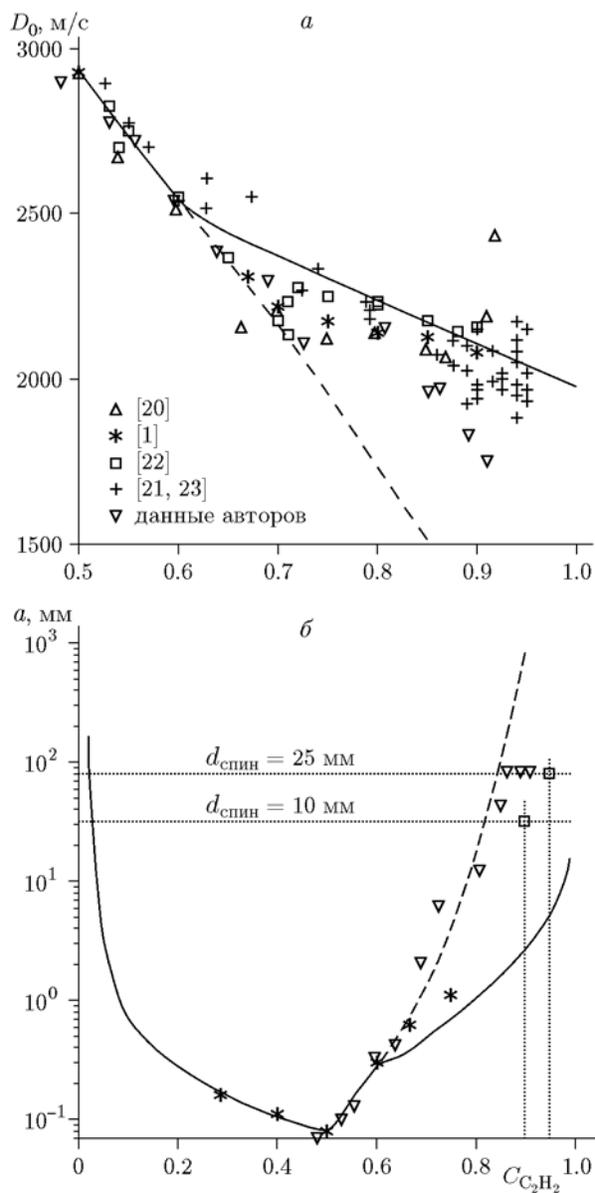


Рис. 4. Ацетиленкислородные смеси:

a — зависимость скорости детонации от содержания топлива; *b* — зависимость поперечного размера ячейки от содержания топлива; сплошная линия — углерод конденсированный, штриховая — углерод газообразный, значки — данные экспериментов

соответствующие газофазному и твердофазному углероду.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для интерпретации экспериментальных данных важно знать, насколько однородным было перемешивание компонентов при проточной подаче газов в реакционную камеру ИГДА, где давление равно атмосферному, и была ли

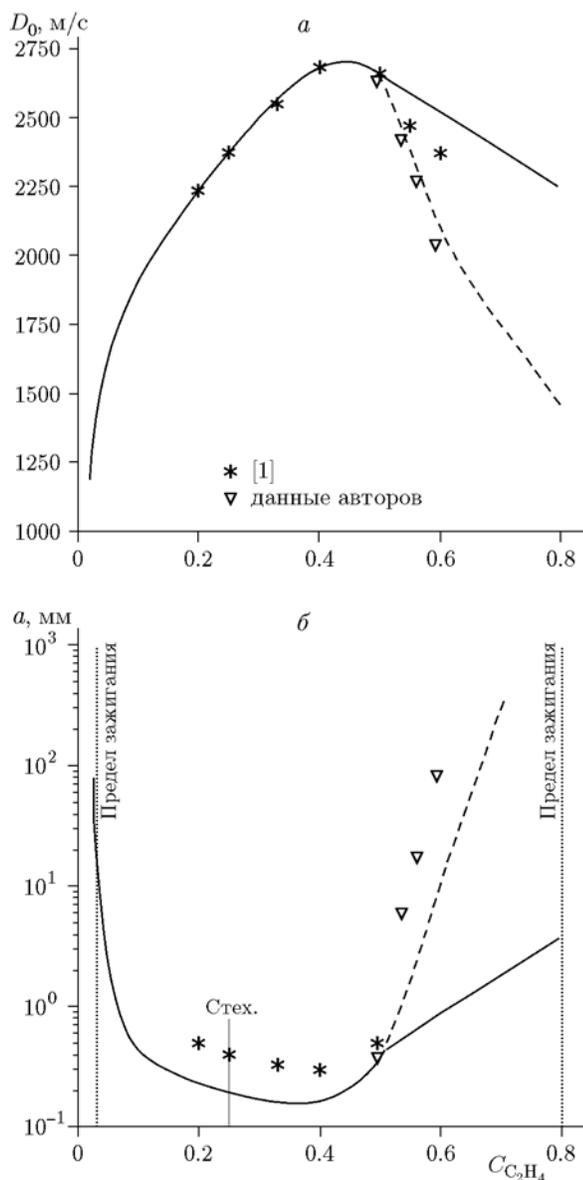


Рис. 5. Этиленкислородные смеси:

a — зависимость скорости детонации от содержания топлива; b — зависимость поперечного размера ячейки от содержания топлива; сплошная линия — углерод конденсированный, штриховая — углерод газообразный, значки — данные экспериментов

детонация стационарной. Однородность смешения компонентов взрывчатой смеси протестирована на ацетиленкислородных смесях вблизи стехиометрии: от $C_2H_2 + O_2$ до $C_2H_2 + 3O_2$. Полученные результаты по скорости детонации в пределах погрешности измерения (около 2 %) не отличались от результатов для смесей соответствующего состава, предварительно перемешанных в стационарных услови-

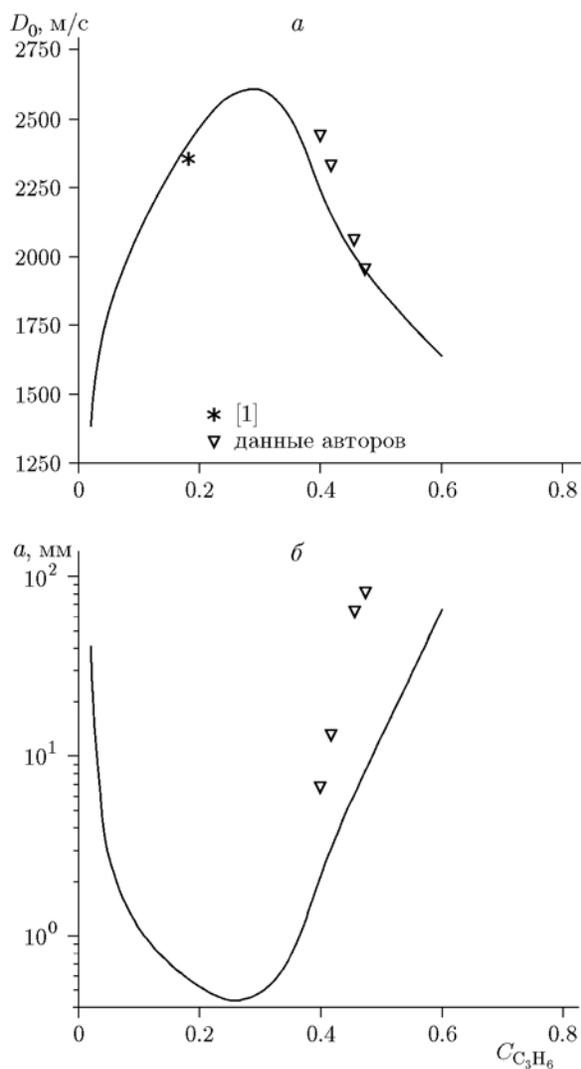


Рис. 6. Пропиленкислородные смеси:

a — зависимость скорости детонации от содержания топлива; b — зависимость поперечного размера ячейки от содержания топлива; линия — расчет, значки — данные экспериментов

ях [1, 21, 22]. В наших экспериментах детонация считалась стационарной, если ее скорости на втором и третьем участках между датчиками 7 (см. рис. 2) не отличались в пределах погрешности измерения и размер регистрируемой ячеистой структуры существенно не менялся по длине фольги. Приведенные экспериментальные данные соответствуют этим условиям.

Известно, что энергия инициирования тесно связана с размером детонационной ячейки, что и подтверждается полученными следовыми отпечатками. Так, при прямом инициировании электрическим разрядом в смесях $C_2H_2 + O_2$ и

$C_2H_4 + O_2$ в секции 3 (см. рис. 2) регистрировалась однородная ячеистая структура с размером ячеек менее 1 мм. По мере обогащения смесей с увеличением размера ячейки до $4 \div 5$ мм (смеси $2.7C_2H_2 + O_2$ и $1.15C_2H_4 + O_2$) энергии разряда для прямого инициирования было уже недостаточно — на следовых отпечатках появлялась характерная картина перехода горения в детонацию.

Для устойчивого возбуждения самоподдерживающейся детонации всех топлив вплоть до спинового режима оказалось достаточно 70 мл (эквивалентно 130 мм длины ствола) заряда-бустера из смеси $C_2H_2 + O_2$. Из этого объема примерно 50 мл приходилось на камеру зажигания, остальной форсажный заряд заполнял около 40 мм начального участка ствола. При этом на следовом отпечатке в секции 3 фиксировалась характерная картина инициирования «сверху» из режима пересжатой детонации с коротким ($2 \div 3$ калибра ствола) участком увеличивающейся ячейки до размера самоподдерживающегося режима, совпадающего с размером в секции 4 (см. рис. 2). У пропилена уже в смеси пограничного состава $C_3H_6 + 1.5O_2$ размер ячейки превышал 5 мм (см. табл. 2), что потребовало форсажного инициирования для всего диапазона переобогащенных смесей этого топлива. Следует отметить, что форсаж в этиленкислородных и пропиленкислородных смесях можно реализовать и без привлечения ацетилена. Для этого пригодны смеси $C_2H_4 + 1.5O_2$ и $C_3H_6 + 3O_2$ с соотношением $O/C > 1$, у которых размер ячейки менее 1 мм.

В итоге, используя стратифицированные заряды, удалось добиться реализации стационарных режимов детонации с постоянной скоростью распространения на всех участках измерения во всех режимах вплоть до пределов, соответствующих появлению спина. Эти пределы зафиксированы при содержании топлива 90 % в ацетиленкислородной смеси, 60 % в этиленкислородной смеси и 47 % в пропиленкислородной смеси.

При молярной концентрации топлива $C > C^*$ дополнительная энергия фазового перехода C (газ) $\rightarrow C$ (конденсат), казалось бы, должна поддерживать скорость детонационной волны, и тем эффективнее, чем больше доля сконденсировавшегося углерода. Однако рис. 4, а демонстрирует большой разброс экспериментальных данных. Видно, что в области с концентрацией C , незначительно превышающей

C^* , измеренные скорости вначале «не чувствуют» влияния конденсации и скорость детонационной волны хорошо согласуется с линией газообразного углерода. И лишь заметно отойдя от значения C^* начинает сказываться влияние конденсации и экспериментальные точки уходят от линии газа к линии конденсированного углерода. Экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, лежат примерно в середине между сплошной и штриховой линиями. Что касается размера ячейки, то из рис. 4, б видно, что экспериментальные данные хорошо совпадают со штриховой линией во всем диапазоне измерений. На наш взгляд, это свидетельствует о том, что конденсация углерода в продуктах детонации ацетиленкислородных смесей происходит в основном за пределами зоны реакции и оказывает небольшое влияние на процесс детонации. То же самое можно сказать и про этиленкислородные смеси (см. рис. 5). Характерным и здесь является слабое влияние конденсации на детонационную волну, причем в области концентраций, как незначительно, так и заметно превышающих граничное значение C^* . Соответствующие графики для пропиленкислородных смесей (см. рис. 6) показывают, что экспериментальные значения скорости детонации лежат близко к расчетным, чего нельзя сказать о размерах ячеек. Это, скорее всего, связано с неточностью данных о кинетических параметрах реакций, применяемых для расчетов данных смесей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена детонация переобогащенных выше границы выделения углеродного конденсата смесей ацетилена, этилена и пропилена с кислородом, перемешиваемых в процессе проточной подачи компонентов взрывчатой смеси через камеру зажигания в реакционную камеру в виде ствола диаметром 26 мм и длиной 2000 мм. Эксперименты выполнены с использованием многоканальной системы газопитания установки детонационного напыления CCDS2000 с компьютерным управлением.

Получены новые экспериментальные данные о скоростях детонации и размерах детонационной ячейки в смесях ацетилен — кислород, этилен — кислород, пропилен — кислород в области концентрации топлива, в которой в продуктах детонации теоретически допустима конденсация углерода, определены пределы детонации в области переобогащенных смесей с

фиксацией спинового режима при атмосферном давлении.

Полученные результаты могут найти применение при разработке технологий получения наноразмерного углерода детонационным сжижением углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Васильев А. А., Пинаев А. В.** Образование углеродных кластеров в волнах горения и детонации газовых смесей // *Физика горения и взрыва*. — 2008. — Т. 44, № 3. — С. 81–94.
2. **Васильев А. А.** Детонационные свойства синтез-газа // *Физика горения и взрыва*. — 2007. — Т. 43, № 6. — С. 90–96.
3. **Cheng R. K., Oppenheim A. K.** Autoignition in methane-hydrogen mixtures // *Combust. Flame*. — 1984. — V. 58. — P. 125–139.
4. **Vasil'ev A. A.** Determination of induction time in multi-fuels systems // *Proc. of the Third Asia-Pacific Conf. on Combustion (ASPACC-2001)*, Seoul National Univ., Seoul, 2001. — P. 493–496.
5. **Poorman R., Sargent H., Lamprey H.** Method and apparatus utilizing detonation waves for spraying and other purposes: U. S. Pat. 2714563. — Patented Aug. 2, 1955.
6. **Kadyrov E., Kadyrov V.** Gas dynamical parameters of detonation powder spraying // *J. Therm. Spray Technol.* — 1995. — V. 4, iss. 3. — P. 280–286.
7. **Fauchais P. L., Heberlein J. V. R., Boulos M. I.** *Thermal Spray Fundamentals. From Powder to Part*. — New York: Springer Science + Business Media, 2014.
8. **Ulianitsky V., Shtertser A., Zlobin S., Smurov I.** Computer-controlled detonation spraying: from process fundamentals toward advanced applications // *J. Therm. Spray Technol.* — 2011. — V. 20, iss. 4. — P. 791–801.
9. **Фролов С. М., Аксенов В. С., Басевич В. Я.** Макет-демонстратор импульсного детонационного двигателя на жидком топливе // *Докл. АН*. — 2005. — Т. 402, № 4. — С. 500–502.
10. **Ульяницкий В. Ю., Штерцер А. А., Злобин С. Б., Кирякин А. Л.** Способ получения тяги: пат. РФ 2330979. — Оpubл. 10.08.08. Бюл. № 22.
11. **Батраев И. С., Васильев А. А., Пинаев А. В., Ульяницкий В. Ю., Штерцер А. А., Лихолобов В. А., Шайтанов А. Г., Суворикин Ю. В., Рыбин Д. К.** Способ получения наноуглерода: заявка на пат. РФ 2016132962, приоритет от 09.08.2016.
12. **Штерцер А. А., Ульяницкий В. Ю., Батраев И. С., Громилов С. А., Окотруб А. В., Сапрыкин А. И.** Диагностика структуры и состава ультрадисперсного углерода, получаемого детонационным способом // *Журн. структур. химии*. — 2014. — Т. 55, № 5. — С. 1031–1034.
13. **Ulianitsky V. Yu., Shtertser A. A., Batraev I. S., Shaitanov A. G., Surovkin Yu. V., Likhobolov V. A.** Detonating combustion of gaseous hydrocarbons in the pulse gas-detonation apparatus producing nano-global carbon // *Proc. All-Russian School-Conf. with Intern. Participation «Chemistry and Physics of Combustion and Dispersed Systems» dedicated to 110th anniversary of corresponding member of Academy of Sciences of the USSR A. A. Kovalsky*, Novosibirsk, ICKC SB RAS, September 19–20, 2016: Electronic publication. — http://www.kinetics.nsc.ru/kovalsky_110/proc_e.htm, paper 04.
14. **Ульяницкий В. Ю., Кирякин А. Л., Штерцер А. А., Злобин С. Б.** Установка для детонационного напыления покрытий: пат. РФ 2 399 430. — Оpubл. 20.09.2010. Бюл. № 26.
15. **Ульяницкий В. Ю., Кирякин А. Л., Штерцер А. А., Злобин С. Б.** Установка для детонационного напыления покрытий: пат. РФ 2 399 431. — Оpubл. 20.09.2010. Бюл. № 26.
16. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** *Гидродинамика*. — Изд. 4-е, стереотип. — М.: Наука, 1988.
17. **Варгафтик Н. Б.** *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. — М.: Старс, 2006.
18. **Ульяницкий В. Ю., Штерцер А. А., Батраев И. С.** Исследование детонации газового топлива на основе метилацетилена и аллена // *Физика горения и взрыва*. — 2015. — Т. 51, № 2. — С. 118–124.
19. **Vasil'ev A. A., Valishev A. I., Vasil'ev V. A., Panfilova L. V., Topchiyan M. E.** Method and calculation code «SAFETY» for determination of detonation hazards // *Proc. Second Asia-Pacific Conf. on Combustion (ASPACC-99)*, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, May 9–12, 1999. — P. 594–597.
20. **Breton J.** *Recherches sur la Detonation des Melanges Gazeux*. — Univ. Nancy, 1936. — (Theses Faculte des Sciences).
21. **Dorge K. J., Stephan F., Wagner H. G.** Acetylene detonations near the upper limit of detonability // *Proc. 17th Intern. Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems (ICDERS-1999)*, July 25–30, 1999. — Univ. Heidelberg IWR, paper 13.
22. **Kistiakowsky G. B., Knight H. T., Malin M. E.** Gaseous detonations. IV. The acetylene-oxygen mixtures // *J. Chem. Phys.* — 1952. — V. 20, iss. 5. — P. 884–887.
23. **Wagner H. G.** Soot formation in combustion // *Proc. Seventeenth Symp. (Intern.) on Combustion*. — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1979. — P. 3–19.