

$$I_k = \frac{1}{\Omega} \int_0^{\infty} \left(\int_s^{\infty} \gamma(x) e^{ik\omega^0 x} dx \right) e^{-ik\omega^0 s} ds,$$

$$\widehat{I}_k = \frac{1}{\Omega_1} \int_0^{\infty} \left(\int_s^{\infty} \gamma(x) e^{ik\omega^0 x} dx \right) e^{-ik\omega^0 s} ds.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Буевич Ю. А., Королева Н. А., Наталуха И. А. Неустойчивость и автоколебания при горении полидисперсного топлива // ФГВ.— 1990.— 26, № 4.
2. Буевич Ю. А., Королева Н. А., Наталуха И. А. Влияние модуляции на горение полидисперсного топлива // Там же.— № 5.

г. Свердловск

Поступила в редакцию 19/IV 1990

УДК 636.46 + 534.222.2

Э. Э. Лин, А. И. Фунтиков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ СГОРАНИЯ СМЕСЕЙ $C_2H_2 + O_2 + N_2$ В ЗАМКНУТЫХ ТРУБАХ

Экспериментально изучались режимы сгорания ацетиленовых смесей $C_2H_2 + O_2 + N_2$ в замкнутых объемах — трубах с закрытыми торцами с сечением 50—80 см² при различных способах иницирования. Найдены условия для бездетонационного сгорания, а также для распространения режима, промежуточного между горением и детонацией.

Возрастающий интерес к исследованиям режимов сгорания топливно-воздушных газовых смесей связан в первую очередь с безопасностью их применения при решении научных и прикладных задач [1—4]. В данной работе экспериментальным путем изучалось сгорание смесей ацетилена с кислородом и азотом в замкнутых объемах — трубах с закрытыми торцами. Такой выбор смесей обусловлен тем обстоятельством, что разложение высших углеводородов в процессе горения может проходить через стадию образования ацетилена [5].

Постановка опытов описана в [6]. Исследовались смеси $C_2H_2 + 2,5O_2 + nN_2$ ($n = 0 \div 46,5$), $C_2H_2 + 5O_2 + nN_2$ ($n = 0 \div 14$), $C_2H_2 + mO_2$ ($m = 2,5 \div 49$), $C_2H_2 +$ воздух. Мольная концентрация ацетилена варьировалась в диапазоне $\alpha_{C_2H_2} = 0 \div 45\%$, начальное давление смесей $p_0 = 0,1 \div 1$ МПа. Для возбуждения процесса вблизи торца применялся взрыв электродетонатора (ЭД), а также высоковольтный искровой разряд конденсатора емкостью $C = 0,1$ мкФ через промежуток длиной $l = 1$ и 15 мм. Напряжения на обкладках конденсатора $u_0 = 40$ и 60 кВ. Использовались трубы круглого сечения с внутренним диаметром $d = 0,1$ м и длиной $L = 2$ и 6 м и труба квадратного сечения с поперечными размерами $0,07 \times 0,07$ м, $L = 1,5$ м. Процессы сгорания регистрировались пьезоэлектрическими датчиками давления, которые располагались на боковой стенке трубы и на закрытом торце, а также прибором СФР в режиме покадровой съемки через прозрачный торец трубы.

Осциллограммы давления, представленные на рис. 1, свидетельствуют о том, что разные условия иницирования смеси одного и того же состава либо изменение состава смеси при одном и том же способе иницирования приводят к режимам сгорания, существенно отличающимся по характеру поведения давления на закрытом торце. Рассмотрим эти режимы более подробно.

При иницировании высоковольтным искровым разрядом через промежуток $l = 1$ мм в трубах с относительной длиной $L/d = 20$ при $p_0 =$

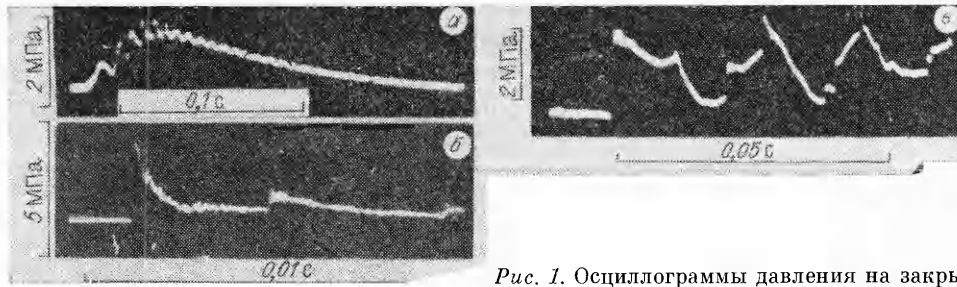


Рис. 1. Осциллограммы давления на закрытом торце трубы.

a — смесь $C_2H_2 + 2,5O_2 + 21,5N_2$, $p_0 = 0,5$ МПа, $L = 2$ м, инициирование высоковольтным искровым разрядом; *b* — $C_2H_2 + 9O_2$, $p_0 = 0,1$ МПа, $L = 2$ м, инициирование высоковольтным искровым разрядом; *в* — $C_2H_2 + 2,5O_2 + 21,5N_2$, $p_0 = 0,5$ МПа, $L = 6$ м, инициирование взрывом ЭД.

$= 0,1$ и $0,5$ МПа бездетонационному сгоранию соответствовала область концентраций ацетилена $2-7\%$ (рис. 2, область I). Средняя скорость сгорания v , определяемая аналогично [6] как отношение длины трубы L к времени τ достижения максимального давления p_{max} , составляла $30-100$ м/с, $p_{max}/p_0 = 3,4 \div 6,8$. Скорость звука c в продуктах горения, определяемая по периоду T циркулирующей акустической волны сжатия между торцами трубы в области максимального давления (см. рис. 1, *a*) при $\alpha_{C_2H_2} = 4 \div 7\%$ составляла $660-1100$ м/с. Увеличение длины разрядного промежутка до 15 мм приводило к более медленному сгоранию с последующим резким возрастанием давления, по-видимому, обусловленным тепловым самовоспламенением смеси в результате адиабатического сжатия перед фронтом пламени.

Увеличение концентрации ацетилена приводило к переходному режиму сгорания (см. рис. 2, II), который характеризовался образованием волны сжатия, распространявшейся в конце трубы на базе $\Delta x = 0,39$ м со скоростью $D_1 = 600 \div 900$ м/с. В одном из опытов в трубе длиной 2 м, заполненной смесью $C_2H_2 + 2,5O_2 + 9N_2$ при $p_0 = 0,5$ МПа, при отражении от торца волны сжатия, двигавшейся со скоростью 600 м/с, зафиксирована ударная волна, распространяющаяся в обратном направлении с $D = 2200$ м/с. Торцевая часть трубы в этом опыте оказалась разрушенной.

При еще большей концентрации ацетилена наблюдался режим нормальной детонации (см. рис. 2, III), распространявшейся с $D_1 \geq 1300$ м/с. Участок постоянного давления на торце, присущий данному режиму (см. рис. 1, *б*), по всей видимости, связан с наличием зоны покоя в продуктах детонации при инициировании от жесткой стенки [8].

Увеличение относительной длины трубы до $L/d = 60$ ($L = 6$ м) сузило концентрационную область бездетонационного сгорания смесей

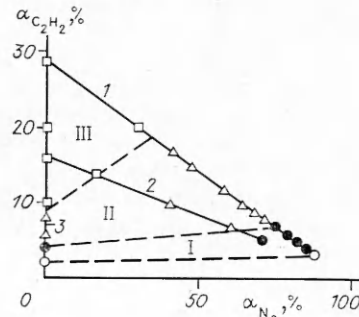


Рис. 2. Концентрационные области горения (I), перехода горения в детонацию (II) и детонации (III) в трубах с относительной длиной $L/d = 20$.

● — горение; ○ — нижний концентрационный предел воспламенения [7]; △ — переход горения в детонацию; □ — детонация; 1 — $C_2H_2 + 2,5O_2 + nN_2$; 2 — $C_2H_2 + 5O_2 + nN_2$; 3 — $C_2H_2 + mO_2$.

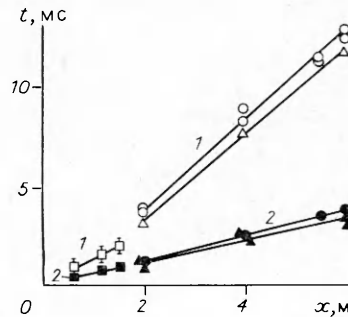
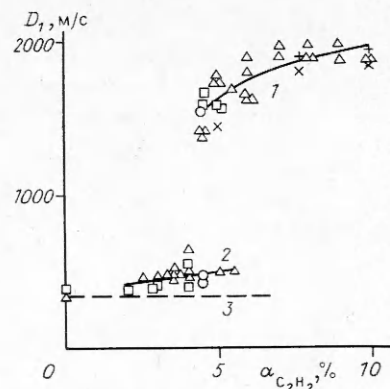


Рис. 3. $x-t$ -диаграммы ударных волн при инициировании взрывом ЭД.

1 — низкоскоростной квазидетонационный процесс; 2 — нормальная детонация; □ — $C_2H_2 + 2,5O_2 + 17N_2$, $p_0 = 0,5$ МПа; ○ — $C_2H_2 + 2,5O_2 + 18,7N_2$, $p_0 = 1$ МПа; △ — $C_2H_2 + 2,5O_2 + 17N_2$, $p_0 = 0,1$ МПа.

Рис. 4. Зависимость скорости детонации от концентрации ацетилена в смесях $C_2H_2 + 2,5O_2 + nN_2$. $L = 6$ м, инициирование взрывом ЭД.

1 — нормальная детонация; 2 — низкоскоростной квазидетонационный процесс; 3 — скорость звука в исходной смеси газов. Данные настоящей работы: Δ — $p_0 = 0,1$ МПа, \square — $p_0 = 0,5$ МПа, \circ — $p_0 = 1$ МПа, \times — $p_0 = 0,1$ МПа, $+$ — $p_0 = 0,5$ МПа — данные [7].



$C_2H_2 + 2,5 O_2 + nN_2$ до $\alpha_{C_2H_2} \leq 4,5\%$ при $p_0 = 0,5$ и 1 МПа. При $\alpha_{C_2H_2} = 5\%$, $p_0 = 0,5$ МПа в конце трубы на базе 1 м наблюдалось распространение детонации с $D_1 = 1330$ м/с.

Иницирование околопредельных смесей с помощью взрыва ЭД вызывало либо нормальную детонацию, либо низкоскоростной квазидетонационный процесс (рис. 3, 4). Для низкоскоростного процесса характер изменения давления на торце трубы был неоднозначен. В ряде экспериментов давление в течение определенного промежутка времени оставалось постоянным, после чего происходил его плавный спад либо резкое возрастание с последующим спадом. В других экспериментах давление снижалось сразу после отражения (см. рис. 1, в).

Существование квазистационарного участка давления при низкоскоростном процессе может быть связано с распространением фронта пламени, движущегося со сверхзвуковой скоростью и создающего впереди себя волну сжатия [9—12]. Спад давления на торце, по-видимому, связан с волной расширения, движущейся вместе с фронтом пламени [11]. Резкое возрастание давления после участка постоянного уровня, по всей вероятности, обусловлено каскадными процессами сгорания [4, 10].

Рассмотрим подробнее низкоскоростной квазидетонационный режим с уменьшающимся со временем давлением. В этом случае средняя скорость падающей ударной волны составляла на базе $x/d \leq 60$ 400—600 м/с и не более чем в 2 раза превышала скорость звука в исходной смеси (см. рис. 4). При отражении такой квазиакустической УВ на торце трубы $p_{max}/p_0 = 5 \div 20$, а амплитуды последующих пульсаций давления в циркулирующей между торцами отраженной волне сжатия в ряде опытов были примерно равны амплитуде первого отражения (см. рис. 1, в). При этом торцевая часть трубы не разрушалась. В этих опытах скорость циркулирующей отраженной волны сжатия D_2 примерно равнялась скорости падающей волны, $D_1 = D_2$. Торцевая киносъемка падающей УВ показала, что интенсивность свечения продуктов сгорания неоднородна по сечению трубы и носит очаговый характер. Данные особенности изучаемого процесса свидетельствуют о неполном выгорании исходной смеси в падающей квазиакустической ударной волне и последующем догорании ее в циркулирующей волне сжатия. В опытах, в которых догорания в отраженной волне не происходило, скорость отраженной волны сжатия равнялась скорости звука в исходной смеси газов.

В двух опытах со смесями $C_2H_2 + 2,5 O_2 + nN_2$ при $\alpha_{C_2H_2} = 4$ и 5 %, $p_0 = 0,5$ МПа на осциллограммах давления в падающей квазиакустической ударной волне на участке трубы $x/d = 10 \div 30$ наблюдался переход от режима с уменьшающимся за фронтом давлением в режим с постоянным давлением за фронтом УВ. При отражении последней от торца трубы сильно разрушались конструктивные элементы устройства, аналогично опытам [10]. Данный процесс, видимо, обусловлен слиянием отдельных очагов горения и образованием в трубе фронта пламени, отстающего от фронта УВ. Разрушение же трубы, по-видимому, связано с каскадными процессами в исходной смеси [4].

Представленные экспериментальные результаты устанавливают области концентраций компонентов смесей $C_2H_2 + O_2 + N_2$, условия инициирования, начальные давления, а также масштабные условия L/d при

$S = \pi/4 \cdot d^2 = 50 \div 80 \text{ см}^2$ для различных режимов сгорания. Отметим, что изученный в [6] и в данной работе низкоскоростной квазидетонационный процесс с уменьшающимся давлением за фронтом ударной волны может циркулировать между закрытыми торцами трубы с примерно постоянной скоростью, проходя при этом расстояния в несколько сотен диаметров. С точки зрения разрушения конструкций наиболее опасными оказались режимы сгорания ацетиленовых смесей, промежуточные между горением и детонацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Борисов А. А. и др. Низкоскоростные квазидетонационные режимы горения топливно-воздушных смесей в шероховатых трубах // Докл. АН СССР.— 1984.— 279, № 6.— С. 1359.
2. Васильев А. А., Митрофанов В. В., Тончиан М. Е. Детонационные волны в газах // ФГВ.— 1987.— 23, № 5.— С. 109.
3. Бейкер У., Кокс П. и др. Процессы горения и взрыва // Взрывные явления. Оценка и последствия.— М.: Мир, 1986.— Гл. 1.
4. Петлегон М. Детонация в газах.— М.: Мир, 1989.
5. Теснер П. А. Образование сажи при горении // ФГВ.— 1979.— 15, № 2.— С. 3.
6. Герасименко В. Ф., Лиш Э. Э. Экспериментальное изучение режимов сгорания смесей $C_2H_2 + N_2O + N_2$ в замкнутых цилиндрических камерах // Там же.— 1989.— 25, № 4.— С. 38.
7. Иванов Б. А. Физика взрыва ацетилена.— М.: Химия, 1969.
8. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды.— М.: ГИТТЛ, 1955.
9. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах.— М.: Мир, 1968.
10. Когарко С. М. Исследование давления в торце трубы при нестационарном быстром горении // ЖТФ.— 1958.— XXVIII, вып. 9.— С. 2042.
11. Щелкин К. И., Трошин Я. К. Газодинамика горения.— М.: Изд-во АН СССР, 1963.
12. Хитрин Л. И. Физика горения и взрыва.— М.: Изд-во МГУ, 1957.

г. Арзамас

Поступила в редакцию 22/VIII 1990,
после доработки — 3/I 1991

УДК 669.546

Н. С. Шарипова, В. Н. Ермолаев, Ч. Г. Хан

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ НА ГРАНИЦЕ МЕЖДУ Cr_2O_3 И Al, МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Методом просвечивающей электронной микроскопии и электронографии проведено моделирование и исследование физико-химических превращений, протекающих в зоне горения системы $Cr_2O_3 - Al$. Установлено, что взаимодействие на границе контакта частиц исходных компонентов сопровождается изменением их агрегатного состояния (расплав, газовая фаза). Восстановление Cr_2O_3 до металлического хрома протекает через образование промежуточного оксида CrO. Подтверждается вывод о возможности использования данного метода для изучения процессов, происходящих в волне горения конденсированных систем.

При исследовании горения конденсированных систем большое значение имеет изучение его стадийности, а также анализ промежуточных и конечных продуктов горения. Актуальность этих исследований очевидна с точки зрения как теории горения конденсированных систем, так и использования СВС-технологии в промышленности для получения материалов с заданными свойствами. Одна из причин недостатка сведений о механизме процессов в волне горения конденсированных систем связана с экспериментальными трудностями ввиду больших скоростей и высоких температур.

Возможный путь решения этих проблем — моделирование процессов. В настоящей работе аналогично [1] для этих целей использовали метод высокотемпературной дифракционной электронной микроскопии. Один