

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ СГОРАНИЯ СМЕСЕЙ $C_2H_2+N_2O+N_2$ В ЗАМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАМЕРАХ

В. Ф. Герасименко, Э. Э. Лин

(Москва)

Представлены результаты экспериментального изучения режимов сгорания смесей ацетилена с газообразными закисью азота и азотом в замкнутых цилиндрических камерах при различных способах иницирования. Выбор смесей обусловлен их высоким энергосодержанием [1, 2], связанным, в частности, с дополнительным тепловыделением при разложении N_2O .

Эксперименты проводили в горизонтально установленных замкнутых цилиндрических камерах (стальные трубы с внутренним диаметром $d = 0,1$ и $0,25$ м, длиной $L = 1 \div 6$ м). В некоторых опытах использовали трубу квадратного сечения $0,07 \times 0,07$ м, $L = 1,5$ м. Диапазон изменения относительной длины камеры — $L/d = 4 \div 60$. Смеси составляли непосредственно в камере перед опытом. Перед напуском компонентов камера вакуумировалась до давления $p_0 \approx 10^{-3}$ МПа.

Мольная концентрация компонентов варьировалась в диапазоне: $\alpha_{C_2H_2} = 0 \div 90\%$, $\alpha_{N_2O} = 10 \div 100\%$, $\alpha_{N_2} = 0 \div 82\%$, $p_0 = 0,1 \div 1,1$ МПа. Начальная температура исследуемых смесей соответствовала температуре окружающего камеру воздуха и составляла 290 ± 10 К.

Процесс возбуждался вблизи торца камеры: 1) взрывом нихромовой проволоочки диаметром 50 мкм и длиной 6 мм разрядом конденсатора емкостью $C = 0,7$ мкФ с начальным напряжением $U_0 = 60$ кВ; 2) взрывом электродетонатора (ЭД); 3) взрывом плоской навески листового ВВ толщиной 1 мм при полном заполнении сечения трубы. Диапазон запасенной энергии, охватываемый данными способами иницирования, составлял $0,2 \div 40$ кДж.

На противоположном торце камеры устанавливали потенциометрический датчик давления типа ДТ-60, ДТ-100 либо пьезоэлектрический датчик давления на основе α -кварца. Последние располагали также и на боковой стенке трубы как отметчики времени. В режиме бездетонационного горения показания потенциометрического датчика позволяли установить максимальное давление продуктов сгорания в камере p_{max} и полное время сгорания τ , равное времени достижения p_{max} . Среднюю скорость сгорания v определяли как отношение L/τ . В режимах перехода горения в детонацию и детонации показания пьезодатчиков позволяли определить среднюю скорость распространения ударной волны (УВ) на базе длины трубы и регистрировать изменение давления со временем в отраженной УВ. Проводили также фоторегистрацию свечения газа в УВ высокоскоростной кадровой кинокамерой через прозрачное оптическое окно в боковой стенке трубы квадратного сечения кинокамерой СКС-1М16, через прозрачную торцевую крышку камеры — прибором СФР в режиме лупы времени.

На рис. 1 представлены осциллограммы давления на торце камеры при разных способах иницирования и концентрациях компонентов. В режиме бездетонационного горения (рис. 1, а) давление в камере плавно нарастало во времени до p_{max} , характеризующего окончание химической реакции выгорания смеси. Затем давление за счет теплоотвода в стенки камеры уменьшалось. Переход горения в детонацию характеризовался образованием волны сжатия, распространявшейся с $D \approx 300 \div 700$ м/с. При отражении волны сжатия от торца камеры давление за фронтом отраженной волны изменялось существенно пестацио-

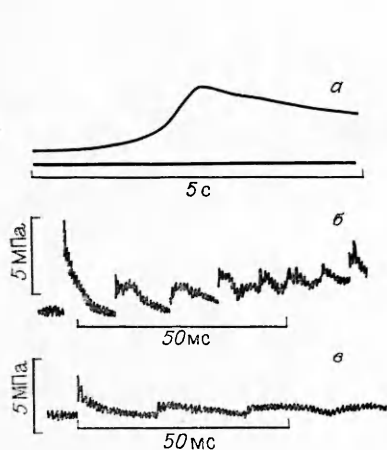


Рис. 1. Осциллограммы давления на торце камеры.

а) инициирование взрывом проволочки, смесь $C_2H_2 + 99N_2O$, $p_0 = 0,5$ МПа, $L = 1$ м, $d = 0,25$ м; инициирование взрывом ЭД, $p_0 = 0,5$ МПа, $L = 3$ м, $d = 0,1$ м; б) $C_2H_2 + 60N_2O$, в) N_2O .

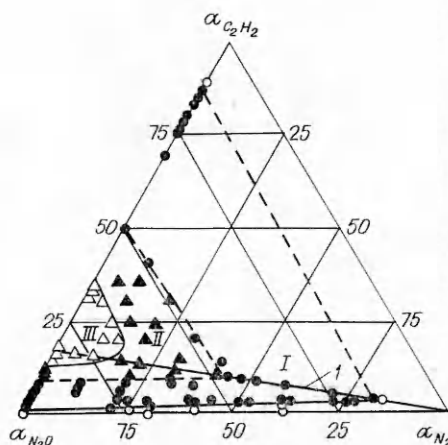


Рис. 2. Концентрационные области горения (I), перехода горения в детонацию (II) и детонации (III) смесей $C_2H_2 + N_2O + N_2$, $L = 1$ м, $d = 0,1$ и $0,25$ м.

$p_0 = 0,1 \div 1,1$ МПа: \circ — нет горения, \bullet — горение; $p_0 = 0,1$ МПа: \blacktriangle — переход горения в детонацию, \triangle — детонация; 1 — стехиометрические смеси $C_2H_2 + 5N_2O + nN_2$.

парно, а амплитуда последующих отражений примерно равнялась амплитуде первого. Отмеченная особенность переходного режима сгорания, но всей вероятности, обусловлена тем, что химические реакции с тепловыделением протекают как за фронтом первичной УВ, так и в циркулирующей отраженной от торцов камеры волне сжатия. Необходимо отметить, что амплитуда давления такого процесса даже при наличии малой концентрации ацетилена существенно больше, чем при отражении волны сжатия в чистой N_2O , распространявшейся к тому же почти в 2 раза медленнее (рис. 1, б, в). Режим детонации характеризовался средней скоростью распространения ≥ 1500 м/с с присущим нормальной детонации участком постоянного давления после первоначального спада и образованием акустической волны сжатия, движущейся со скоростью, равной примерно половине скорости детонации.

Установленные в опытах с инициированием взрывом проволочки области концентраций компонентов в камерах с $L/d = 4$ и 10 приведены на рис. 2. Линия 1 разделяет области с избытком (ниже) и с недостатком окислителя (выше ее). Горение ниже линии 1 изучено при $p_0 = 0,1 \div 1,1$ МПа, причем нижняя граница этой области соответствует $p_0 = 0,5 \div 1,1$ МПа, в областях II и III $p_0 = 0,1$ МПа.

Иницирование взрывом проволочки смесей $C_2H_2 + N_2O + N_2$ при $p_0 = 0,5 \div 1,1$ МПа с $\alpha_{C_2H_2} = 1 \div 3,2\%$ и $\alpha_{N_2O} = 16 \div 99\%$ приводило к бездетонационному режиму сгорания с $v \approx 0,23 \div 1$ м/с. При этом отношение максимального давления продуктов горения к начальному составляло $6,4 \div 12,9$ в зависимости от концентраций C_2H_2 и N_2O .

В камере с $L/d = 60$ при инициировании стехиометрических смесей $C_2H_2 + 5N_2O + nN_2$ взрывом ЭД нормальная детонация имела место при $\alpha_{C_2H_2} \geq 5\%$ (рис. 3). Средняя скорость нормальной детонации в диапазоне концентраций ацетилена $5-16,8\%$ возрастала от $1,8$ до $2,5$ км/с. При $\alpha_{C_2H_2} = 3,2 \div 5\%$ горение переходило в детонацию со средней скоростью распространения УВ $400 \div 600$ м/с и с нестационарным изменением давления за фронтом УВ.

Иницирование смеси $C_2H_2 + 60N_2O$ взрывом ЭД приводило либо к распространению нормальной детонации с $D = 1800$ м/с, либо к переходному режиму сгорания с $D \approx 700$ м/с (рис. 4). Наконец, инициирование этой смеси с небольшой добавкой CO_2 взрывом навески ВВ создавало нормальную детонацию. Киносъемка через боковое оптическое

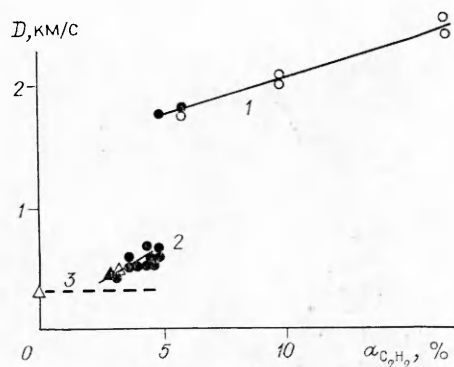


Рис. 3. Зависимость скорости детонации смесей $C_2H_2 + 5N_2O + nN_2$ от концентрации ацетилена. Иницирование взрывом ЭД, $L = 6$ м, $d = 0,1$ м.

1 — нормальная детонация; 2 — переходный режим; 3 — скорость звука в исходной смеси; p_0 , МПа: \circ — 0,1, \bullet — 0,3, \triangle — 0,5, \blacktriangle — 0,7.

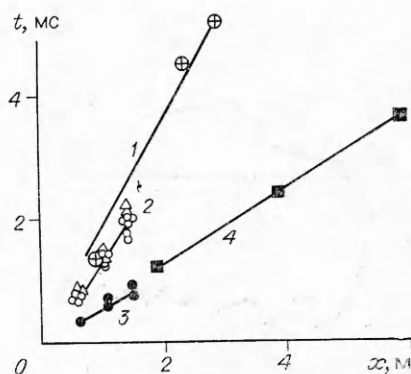


Рис. 4. $x-t$ -диаграммы фронта ударной волны.

1, 4 — $C_2H_2 + 60N_2O$, $p_0 = 0,5$ МПа, $d = 0,1$ м, иницирование взрывом ЭД (1 — нормальная детонация, 4 — переходный режим); 2, 3 — $C_2H_2 + 60N_2O + 2CO_2$, труба сечением $0,07 \times 0,07$ м (2 — иницирование взрывом ЭД, 3 — иницирование взрывом листового заряда ВВ, $p_0 = 0,3$ МПа); \circ — $p_0 = 0,3$ МПа, \triangle — $p_0 = 0,5$ МПа.

окно показала, что в случае нормальной детонации свечение прекращается примерно через 20 мс, а при переходном режиме — через 500 мс, что можно объяснить постепенным догоранием смеси в циркулирующей отраженной волне сжатия. Торцевой кинесъемкой процесса распространения переходного режима в камере с $L/d = 10$ ($L = 1$ м, $d = 0,1$ м) при $p_0 = 0,3$ МПа установлено, что интенсивное свечение имело место в локальных областях поперечного сечения трубы в каждый момент времени. Этот факт, по-видимому, связан с очаговым характером протекания химических реакций с тепловыделением за фронтом волны сжатия.

Переходный режим сгорания с нестационарным изменением давления за фронтом волны сжатия, движущейся с $D \approx 300 \div 700$ м/с, по-видимому, можно рассматривать как низкоскоростной квазидетонационный [3] с неполным тепловыделением в квазиакустической УВ, связанным с очаговым характером протекания химических реакций. Средняя скорость волны сжатия такого процесса на базе распространения, составляющей примерно 60 диаметров трубы, не более чем в 2 раза превышает скорость звука в исходной смеси (см. рис. 3). При распространении на большей базе, по всей вероятности, будет происходить слияние отдельных очагов горения и образование фронта пламени, отстающего от фронта УВ. Такая конфигурация характерна, например, для галолирующих режимов детонации, исследованных в [4, 5] на длине до нескольких сотен диаметров трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Б. А. Физика взрыва ацетилена.— М.: Химия, 1969.
2. Брандт Б. Б., Розловский А. И. Докл. АН СССР, 1960, 132, 5, 1129.
3. Зельдович Я. Б., Борисов А. А. и др. Докл. АН СССР, 1984, 279, 6, 1359.
4. Ульяницкий В. Ю. ФГВ, 1981, 17, 1, 118.
5. Ульяницкий В. Ю. ФГВ, 1980, 16, 3, 101.

Поступила в редакцию 17/XI 1987,
после доработки — 8/IV 1988