

рического поля изменяется и направление движения газа под действием поля. Это делает понятным существование критической разности потенциалов. На теплерограммах процесса, визуализирующих движение газа перед фронтом пламени, хорошо видно изменение направления циркуляционного движения газа при изменении направления электрического поля.

Резюмируя изложенное выше, можно сделать следующие выводы:

1. Под влиянием поперечного электрического поля скорость распространения фронта пламени u_p возрастает. Найдена зависимость величины u_p от разности потенциалов на пластинах конденсатора, в котором сгорает смесь.

2. Показано, что увеличение скорости распространения пламени в электрическом поле обусловлено увеличением поверхности пламени.

3. Обнаружено существование критической разности потенциалов.

4. Показано, что под влиянием поперечного электрического поля происходит перераспределение градиентов показателя преломления в зоне реакции, приводящее в некоторых случаях к появлению периодической структуры во фронте пламени.

*Поступила в редакцию
27/VIII 1968*

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Д. Саламандра, И. К. Федосеева. ИФЖ, 1964, 7, 7, 47.
2. Г. Д. Саламандра. Сб. «Исследования по физической газодинамике». М., «Наука», 1966.
3. Г. Д. Саламандра. Высокоскоростная съемка шлирен-методом. М., «Наука», 1965.
4. Г. Д. Саламандра. Сб. «Свойства газов при высоких температурах. Физическая газодинамика, термодинамика и физика горения». М., «Наука», 1967.
5. Г. А. Барский, Я. Б. Зельдович. ЖФХ, XXIV, 5, 589.

УДК 536.468

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГОРЕНИЯ АЦЕТИЛЕНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ЧЕРЕЗ УЗКИЕ ОТВЕРСТИЯ И ЩЕЛИ

Н. А. Бойков, А. Г. Ихно, Л. Б. Резник

(Донецк)

Известно, что распространение горения газо-паровоздушных смесей можно локализовать в замкнутом объеме путем ограничения параметров каналов, через которые внутренний объем оболочки сопрягается с внешней взрывчатой средой.

Согласно [1], критический диаметр отверстия (или зазор щели) $\delta_{кр}$ зависит от нормальной скорости горения смеси u_n и температуропроводности κ , т. е.

$$\delta_{кр} = \frac{Pe \kappa}{u_n}, \quad (1)$$

где Pe — критерий Пекле, постоянство которого достигается на пределе гашения пламени. В работе [2] показано, что величина Pe несущественно отличается для различных горючих смесей, хотя и не может быть строго постоянной. Поэтому, зная критический зазор для одной из смесей ($\delta_{кр_1}$), а также ее нормальную скорость горения u_{n_1} и температуропроводность κ_1 , можно определить характеристический зазор $\delta_{кр_2}$ для любой другой смеси (по известной u_{n_2} и κ_2)

$$\delta_{кр_2} = \frac{\delta_{кр_1} u_{n_1}}{\kappa_1} \cdot \frac{\kappa_2}{u_{n_2}}. \quad (2)$$

В таблице даны экспериментальные и расчетные значения $\delta_{кр}$ для ряда горючих смесей. Расчет проведен по формуле (2) с использованием экспериментального значения $\delta_{кр}$ для водородно-воздушной смеси.

Отсюда видно, что расчетное значение $\delta_{кр}$ для большинства горючих смесей хорошо согласуется с экспериментальными данными. Однако для 12,5%-ной ацетилено-воздушной смеси расчетное $\delta_{кр}$ более чем в 10 раз превышает эксперимент (для этой смеси значение $\delta_{кр}$ минимальное). Таким образом, в ацетилено-воздушной смеси распространение горения происходит через отверстия и щели меньше критических. В связи с этим были проведены исследования по выяснению механизма распространения горения ацетилено-воздушной смеси в подобных условиях.

Горючая смесь с воздухом	Концентрация горючего, % в объемных ед.	Величина зазора, мм	
		расчет	эксперимент
Водород	32	—	0,275
Ацетон	6,3	1,06	1,016
Метан	9,8	1,12	1,17
Эфир	4,0	0,95	0,864
Хлорбензол	4,0	1,15	0,99
Сероуглерод	7,0	0,33	0,203
Этилдихлорсилан	800(мг/л)	0,39	0,45
Ацетилен	12,5	0,314	<0,025

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования велись на двух установках, снабженных прочной оболочкой из нержавеющей стали цилиндрической формы (высота оболочки равна диаметру). Над корпусом оболочки помещалась металлическая крышка, между ними имелась щель с определенным зазором.

В первой установке оболочка помещалась под прозрачную целлофановую пленку. В этом случае продукты взрыва, выбрасываемые из оболочки через щель, попадали в замкнутое пространство, ограниченное целлофановой пленкой.

Во второй установке к щелевому зазору между крышкой и корпусом оболочки приставлялась труба, выполненная из прозрачного органического стекла. В этом случае в трубу попадала только часть продуктов горения смеси в оболочке.

В обеих установках оболочка, пространство, ограниченное целлофаном, и труба могли заполняться ацетилено-воздушной смесью любой концентрации. При этом оболочка могла заполняться одной концентрацией, а пространство, ограниченное целлофаном, или труба — другой. Это достигалось путем уплотнения щелевого зазора оболочки снаружи резиновым кольцом, после чего взрывоопасная смесь в оболочке создавалась по парциальным давлениям газов, а в среде, окружающей оболочку (или в трубе), — путем заполнения ее из газгольдера предварительно подготовленной смесью. Кроме того, путем отдельного заполнения отсеков трубы, отделенных легкоъемной перегородкой, часть трубы вблизи оболочки заполнялась одной концентрацией, а часть, расположенная вдали от оболочки, — другой. Перед иницированием процесса горения перегородка в трубе убиралась. Время от момента удаления перегородки до подачи иницирующего импульса составляло 0,3—0,5 сек, поэтому можно допустить, что в процессе опыта градиент концентраций вдоль трубы сохранялся неизменным.

Взрывчатая смесь внутри оболочки воспламенялась искрой от высоковольтного индуктора. Источник воспламенения располагался в центре оболочки.

Процессы в окружающей оболочку среде регистрировались на фотопленку. Для этого использовались фотоаппарат со стробоскопическим диском, вращающимся со скоростью 3000 об/мин, камера СКС-1М с частотой съемки 8000 кадр/сек и кинокамера «Admira» при частоте съемки 32 кадр/сек.

Иницирование процесса горения в оболочке синхронизировалось с пуском киносъемочной и измерительной аппаратуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В опытах, когда оболочку окружал воздух, выброс пламени не наблюдался при зазоре 0,5 мм и менее. При зазорах от 0,03 до 0,15 мм наблюдается выброс частиц; по мере увеличения зазора их количество и яркость возрастают. При зазорах 0,15—0,5 мм наблюдается выброс групп частиц, которые ведут себя, как твердые тела, способные отражаться от преграды и изменять траекторию полета. Движение отраженных частиц хаотическое, скорость значительно меньше, чем до столкновения с преградой, что свидетельствует о неупругом ударе, малых плотности и массе частиц.

Многие исследователи указывают на образование твердых частиц углерода при взрывном горении углеводородов, и, в частности, ацетилено-воздушных смесей [3, 4]. При взрывах в замкнутых сосудах на образование частиц углерода оказывает значительное влияние высокое конечное давление и повышение температуры вследствие адиабатического сжатия перед воспламенением еще не сгоревшей смеси.

Результаты экспериментов со взрывами в закрытых сосудах показали, что после прохождения фронта пламени в центре сосуда возникает яркая светящаяся зона, размеры которой постепенно увеличиваются. При наличии щели в сопряжении крышки оболочки с корпусом светящаяся зона вытягивается в сторону щели и частично выбрасывается за пределы оболочки. Если оболочка имеет устройство, обеспечивающее примерно трехкратное снижение конечного давления, по сравнению с конечным давлением в замкнутом сосуде, образование светящейся зоны и вылет частиц не наблюдаются. Таким образом, вылет светя-

щихся частиц при взрыве ацетилено-воздушных смесей можно связывать с образованием светящейся зоны, состоящей, по-видимому, из мелкодисперсных частиц сажи [5, 6].

Известно [7], что в ряде случаев размеры частичек сажи ацетиленового пламени весьма малы и составляют 13 \AA в поперечнике и 21 \AA в длину. Светящиеся частицы, вылетающие при взрыве через узкие щели, являются гораздо более крупными образованиями, формирующимися непосредственно в оболочке из мелкодисперсных частиц указанных размеров. Эти более крупные частицы обладают малой плотностью, высокой пористостью и, таким образом, большей реакционной поверхностью.

Если механизм образования зародыша-радикала и его переход в частицу с физической поверхностью еще далеко не исследован, то стадия, связанная с чисто поверхностным процессом роста частиц, исследована достаточно полно [8]. Рост частицы происходит за счет прямого разрушения на ее поверхности ударяющихся о нее молекул ацетилена, и в результате тепла экзотермического разложения сажи частица нагревается до температуры 3000°K , а скорость процесса роста частиц прямо пропорциональна концентрации углеводорода. Образующиеся в оболочке частицы сажи, вместе с газообразными продуктами горения, выбрасываются из нее в окружающее пространство. При этом вследствие теплопотерь в стенки щели или отверстия температура частиц понижается. Однако некоторые частицы сажи после прохождения щели или отверстия остаются еще достаточно активными, процесс разложения молекул ацетилена на их поверхности может продолжаться. Если окружающая оболочка среда содержит сравнительно высокий процент ацетилена, этот процесс приводит к нагреву частиц, что, в свою

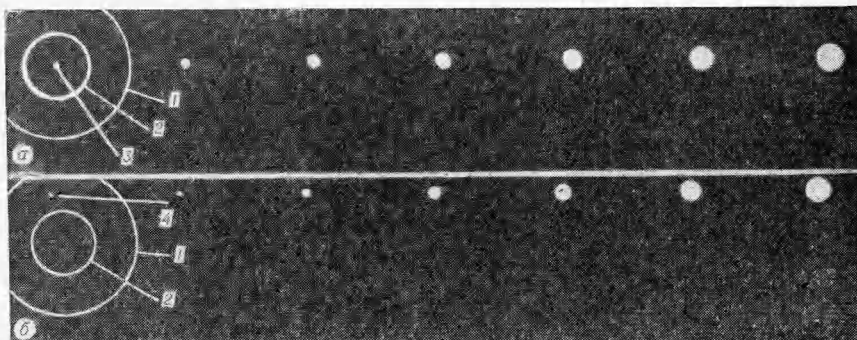


Рис. 1. Кадры скоростной съемки начальной стадии распространения 12,5%-ной ацетилено-воздушной смеси в экспериментальной оболочке (а) и в окружающей (б) среде (во взрывной камере).

1 — контур взрывной камеры; 2 — контуры оболочки (наружные кромки фланцев); 3 — воспламенение смеси в оболочке (искра индикатора); 4 — воспламенение смеси во взрывной камере сажиистой частицей. Частота съемки 2000 кадр/сек, время между воспламенениями $0,111 \text{ сек}$.

очередь, ускоряет реакцию разложения на их поверхности. Так, при отсутствии в окружающей среде ацетилена частицы сажи, выброшенные из оболочки, сгорают за время $0,01—0,1 \text{ сек}$. При наличии в окружающей атмосфере 12,5% ацетилена частицы сажи, выброшенные из оболочки через зазор $0,03—0,15 \text{ мм}$, в течение $0,05—0,2 \text{ сек}$ разгораются и затем через $0,002—0,005 \text{ сек}$ воспламеняют окружающую среду

(рис. 1, 2). При этом обычно число активных частиц, которые приводят к воспламенению, составляет от 1 до 5.

При наличии в окружающей среде 20% ацетилена количество и яркость видимых снаружи оболочки частиц сажи значительно возрастают. При этом время свечения отдельных частиц достигало нескольких десятков секунд, однако воспламенение окружающей среды не происходило. Длительное свечение частиц в 20%-ной ацетилено-воздушной смеси, по-видимому, связано с интенсивными поверхностными реакциями разложения ацетилена.

Естественным было предположить, что при дальнейшем повышении концентрации ацетилена в окружающей среде яркость и длительность свечения частиц еще более повысятся. Однако в 25—30%-ной ацетилено-воздушной среде яркость частиц оказалась меньше, чем в 20%-ной, а длительность свечения не превышала 0,1 сек. Это законо-

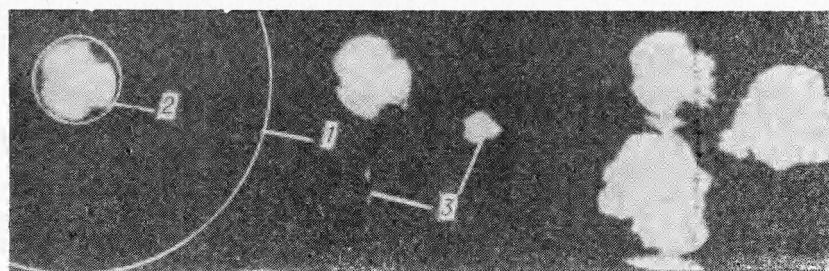


Рис. 2. Кадры скоростной съемки начальной стадии распространения 12,5%-ной ацетилено-воздушной смеси, инициированной группой сажистых частиц, вылетевших из оболочки через узкую фланцевую щель. 1 — контуры взрывной камеры; 2 — контуры оболочки (наружные кромки фланцев); 3 — воспламенение смеси во взрывной камере сажистыми частицами. Частота съемки 4500 кадр/сек.

мерно, так как, согласно кислородной теории сажеобразования [9], одним из обязательных условий роста частиц сажи с физической поверхностью за счет разложения ацетилена является присутствие кислорода в смеси. Причем определенные этапы реакции разложения происходят при соотношении $C_2H_2 : O_2 = 1 : 1$, которому соответствует смесь состава 17,44% ацетилена с воздухом.

С ростом температуры частиц энергия активации реакции экзотермического разложения уменьшается, приближаясь к нулю. Одновременно происходит окисление частиц. Однако вследствие того, что энергия активации этого процесса значительно выше энергии активации процесса разложения, на первом этапе преобладает процесс разложения ацетилена, приводящий к росту и разогреву частиц. В дальнейшем, при нагреве частиц до определенной температуры реакция окисления начинает, по-видимому, преобладать над реакцией экзотермического разложения, что приводит к более быстрому разогреву и сгоранию частиц.

Так как энергия активации процесса воспламенения 20%-ной ацетилено-воздушной смеси выше, чем 12,5%-ной, и меньшее процентное содержание кислорода не обеспечивает достаточно эффективного окисления частиц, то при сравнительно малой величине частиц энергии, выделяющейся при сгорании частиц, оказывается недостаточно для воспламенения 20%-ной, но достаточно для воспламенения 12,5%-ной смеси.

Более бедные смеси (7-10% C_2H_2) также могут воспламеняться частицами сажи. Однако малое количество ацетилена в этих смесях и большее количество кислорода приводят к тому, что частицы быстро сгорают, не успев достигнуть критических размеров, достаточных для воспламенения горючей смеси.

В опытах, когда в примыкающей к оболочке части трубы содержание ацетилена составило 20%, а в более удаленной — 10-12%, кино-съемки наблюдаемого процесса распространения горения показали, что выбрасываемые взрывом из оболочки через зазор менее 0,03 мм частицы сажи быстро разгораются в первой части трубы и, хаотически двигаясь, приближаются ко второй части, где и воспламеняют взрывчатую смесь. При этом длительность процесса в целом достигала 1-2 сек. При заполнении трубы двумя смесями (20 и 12%) частота воспламенения частицами, выбрасываемыми через зазор 0,03-0,1 мм, носит случайный характер.

Следует отметить, что при взрыве в оболочке 20-25%-ной ацетилено-воздушной смеси, несмотря на большое количество выбрасываемых частиц, они не только не воспламеняют окружающую 12%-ную смесь, но и не разгораются в 20%-ной смеси ацетилена с воздухом.

Таким образом, установлено, что при распространении горения ацетилено-воздушных смесей через узкие отверстия и щели имеет место новое явление, сущность которого состоит в том, что образующиеся в пламени твердые частицы углерода, имеющие незначительные размеры (порядка $2 \cdot 10^{-4}$ мм), выносятся газообразными продуктами взрыва через узкие отверстия или щели, за которыми, вследствие реакции экзотермического разложения ацетилена на поверхности частиц, их размеры и температура увеличиваются до значений, при которых они воспламеняют смесь.

Поступила в редакцию
27/VIII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11.
2. В. Ф. Заказнов, А. И. Розловский, И. И. Стрижевский. Инж. журнал, 1963, 3, 2.
3. П. А. Теснер. «Газовая промышленность», 1961, 5.
4. А. Гейдон. Спектроскопия пламен, М.—Л., ИЛ, 1959.
5. А. Г. Ихно. Тр. МакНИИ, т. XVI, 1965, 351.
6. Н. А. Бойков, А. В. Григорьева и др. Тр. Гипронисэлектрошахт, вып. 3, 1965.
7. А. Г. Гейдон, Х. Г. Вольфгард. Пламя, его структура, излучение и температура. М., ИЛ, 1959.
8. П. А. Теснер. «Газовая промышленность», 1960, 2.
9. A. G. Gaydon, H. G. Wolfgard. Proc. Roy. Soc., 1950, A201, 561.