

5. Беляев А. Ф., Боболев В. К. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв.— М.: Наука, 1973.
6. Афанасенков А. Н., Воскобойников И. М. Хим. физика, 1984, 3, 2, 272.
7. Дубовик А. В. Докл. АН СССР, 1986, 286, 2, 377.

г. Москва

Поступила в редакцию 13/III 1989

УДК 662.215

Е. П. Беликов, В. Е. Храповский, Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов

### ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВЗРЫВА В ПОРОШКООБРАЗНОЙ МОДЕЛЬНОЙ СМЕСИ ПЕРХЛОРАТ АММОНИЯ — ПОЛИСТИРОЛ

На примере модельной мелкодисперсной смеси ПХА — полистирол в [1] показано, что в порошкообразном состоянии такие смеси весьма взрывоопасны и по сравнению со штатными бризантными ВВ их горение гораздо легче теряет устойчивость и переходит во взрыв и детонацию. В данной работе с помощью совместных фотографических и пьезометрических измерений получена подробная информация относительно механизма и закономерностей взрывного процесса в аналогичной смеси.

Опыты проводились на стехиометрической смеси 90 % ПХА + 10 % полистирола плотностью  $\rho = 0,66 \text{ г/см}^3$  (пористость 0,64) с газопроницаемостью около 10 Д. Средний размер частиц ПХА и полистирола, определенный по газопроницаемостям порошков, равен 25 и 10 мкм соответственно.

Исследуемую смесь помещали в цилиндрический канал прозрачной плексигласовой оболочки (в основной серии опытов внутренний диаметр 15 мм, длина  $l = 300 \text{ мм}$ ), которая крепилась к стальной пластине, имеющей ряд отверстий под высокочастотные пьезоэлектрические датчики давления. Сигнал с пьезодатчиков через усилитель записывался на регистратор быстропротекающих процессов DATALAB. Процесс горения фотографировали через щелевые диафрагмы одновременно на два ждущих фоторегистратора ЖФР-3 и ФР-11, скорости развертки которых (15—100 и 0,1—10 м/с соответственно) обеспечивали надежную регистрацию скорости фронта свечения, изменяющуюся в диапазоне от 0,1 до 2000 м/с. Горение инициировали спиралью накаливания по двум вариантам. В первом спираль вводили через открытый верхний торец канала оболочки и размещали сверху на слое горючей смеси (поджигание от открытого торца). Во втором варианте спираль вводили в канал оболочки снизу через отверстие в заглушке (поджигание от закрытого торца).

Для синхронизации фоторазверток и профилей давления совмещали середину участка нарастания сигнала, записанного датчиком давления, который попадал в область реализации низкоскоростной детонации (длительность этого участка  $\sim 20 \text{ мкс}$ ), с моментом, когда фронт свечения проходил место расположения этого датчика. Точность такой синхронизации не хуже  $\pm 10 \text{ мкс}$ .

Рассмотрим результаты эксперимента. При поджигании от открытого торца заряда длиной 150 мм смесь выгорает без взрыва с равномерной скоростью  $u \approx 2,4 \text{ мм/с}$ , отвечающей послойному горению. Если же к оболочке присоединить газоотводящую трубку длиной 1,3 м, то горение ускоряется и переходит в низкоскоростную детонацию. Картина развития взрывного процесса, полученная с помощью фоторегистрации, показана на рис. 1 и 2. Здесь координата  $x$  отсчитывается от поверхности в глубину заряда в направлении оси канала оболочки. Можно выделить следующие три стадии процесса.



Рис. 1. Фоторегистрограммы взрывного процесса при поджигании от открытого торца.

а) первая и вторая стадии, скорость развертки 30 см/с; б) вторая и третья стадии, скорость развертки 50 м/с.

После поджигания горение распространяется в глубь заряда в пульсирующем режиме, для которого характерны зигзагообразная форма фронта свечения и отток диспергируемых горящих частиц смеси в объем газоотводящей трубки. Длительность этой стадии  $t = 0,2 \div 0,3$  с, расстояние, пройденное фронтом пламени, 20—40 мм, средняя скорость фронта пламени  $u_{\text{д}} \approx 0,1$  м/с при максимальной скорости в пульсации до 2 м/с. Развиваемое на этой стадии избыточное давление  $p < 50$  кПа (порог запуска регистратора) и по оценке, основанной на скорости оттока продуктов горения,  $p < 10$  кПа.

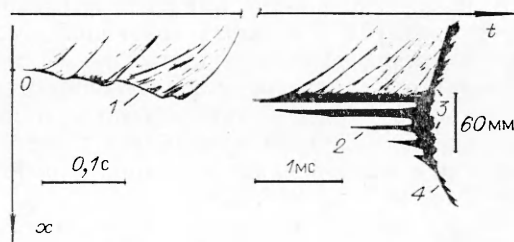
Вторая стадия ( $t = 2 \div 4$  мс) отделена от первой провалом свечения длительностью до 40 мс. Зона свечения состоит из ряда горизонтальных полос, разделенных темными промежутками, сплошной передний фронт свечения, как правило, отсутствует, скорость распространения пламени, измеренная по огибающей начальных точек светлых полос, увеличивается по мере развития процесса от 1—3 до 100—150 м/с. Одновременно в зоне горения регистрируется рост  $p$  до 20 МПа. Пламя проникает на глубину до 80—100 мм от точки, где первоначально находился воспламеняемый торец заряда. Эволюция во времени пространственных профилей давления, построенных по результатам измерения давления в нескольких точках по длине заряда, показана на рис. 3. Видно, что первоначально давление возрастает в свободном объеме канала оболочки и газоотводящей трубки и лишь затем начинается рост  $p$  в области, занятой исходным веществом (с максимумом на глубине 40—50 мм).

Третья стадия процесса — образование в зоне горения на расстоянии ~20—40 мм позади фронта пламени ярко светящейся области, рождающей две волны, одна из которых бежит вперед, в направлении исходной смеси, а другая — назад, в сторону газоотводящей трубки с  $u \approx 2000$  м/с. Одновременно в этой области стремительно растет давление, достигая 250 МПа. Длительность этой стадии — несколько десятков микросекунд. Формирование этих волн, отмечаемых на фоторегистрограммах, фиксируется также датчиками давления. Волна, бегущая вперед, догоняет фронт пламени и выходит в исходную смесь, порождая низкоскоростную детонацию с  $u \approx 1000$  м/с. Точка, где вторичная волна догоняет первичный фронт пламени, служит для определения длины участка перехода горения в низкоскоростную детонацию,  $L_{\text{нд}}$ . В данном случае  $L_{\text{нд}} \approx 100$  мм.

Дальнейшее развитие взрывного процесса прекращается из-за разрыва плексигласовой оболочки на участке, где формируется вторичная волна и давление максимально. В результате давление падает, волна низкоско-

Рис. 2. Общая схема взрывного процесса при поджигании от открытого торца.

1 — пульсирующее конвективное горение; 2 — ускоряющееся конвективное горение; 3 — вторичная волна (прямая и обратная); 4 — волна низкоскоростной детонации.



ростной детонации деградирует, горение прекращается. Увеличение  $l$  от 150 до 300 мм при сохранении газоотводящей трубки не оказывает влияния на протекание процесса. После опыта остается нижняя неразрушенная часть оболочки с исходным веществом начальной плотности. При  $l = 30$  мм реализуется лишь первая стадия процесса, вторая и третья стадии исчезают, повышение давления не фиксируется.

Изучено также влияние, которое оказывают на развитие взрывного процесса прочность оболочки, расположение и мощность воспламенителя, диаметр заряда, плотность смеси и дисперсность окислителя.

Эксперименты, проведенные с зарядами диаметром  $d = 5$  мм в стальных оболочках со щелевым окном по методике, описанной в [1, 2], показали, что отличия, связанные с прочностью оболочки, проявляются лишь на завершающей стадии взрыва: в прочных оболочках скорость процесса возрастает до 3000 м/с, а  $p \geq 700$  МПа. На предшествующих стадиях какого-либо различия в пределах экспериментального разброса не зафиксировано. Однако поскольку указанные нагрузки опасны для датчиков давления, то проведение опытов в установке с плексигласовой трубкой, обеспечивающей переход горения в низкоскоростную детонацию в исследуемой смеси, предпочтительнее.

При поджигании от закрытого торца пульсирующее горение отсутствует и реализуются вторая и третья стадии, описанные выше. Фронт пламени сразу после поджигания распространяется ускоренно. Из-за ограничения оттока продуктов сгорания распределение давления по длине заряда за фронтом пламени более однородно, чем при воспламенении от открытого торца. Несколько меньше оказалась и длина участка  $L_{нсд} \sim \sim 70$  мм. В остальном внешние проявления взрывного процесса в этих двух вариантах близки. Это касается условий формирования и параметров вторичной волны, скорости распространения пламени, характера свечения и временных масштабов эволюции пространственных профилей давления.

Увеличение длины заряда до 300 мм не сказывается на процессе из-за разрыва плексигласовой оболочки. При уменьшении  $l$  до 50—70 мм смесь выбрасывается из оболочки через верхний открытый торец без взрыва, повышение давления не регистрируется, скорость фронта свечения не превышает 12 м/с, после опыта на стенках установки и вокруг нее остается большое количество несгоревшей смеси.

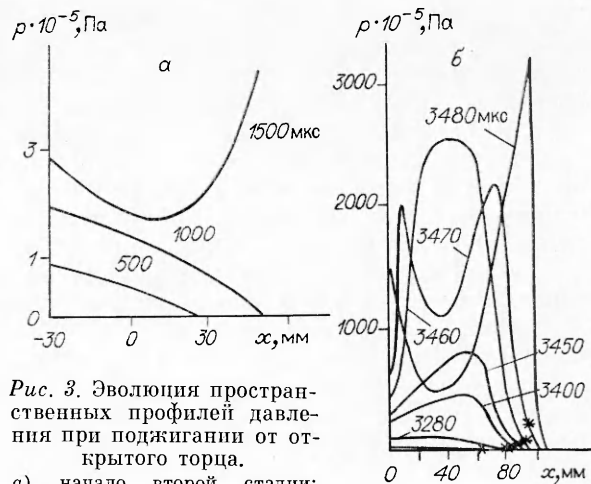


Рис. 3. Эволюция пространственных профилей давления при поджигании от открытого торца.  
а) начало второй стадии;  
б) вторая и третья стадии.

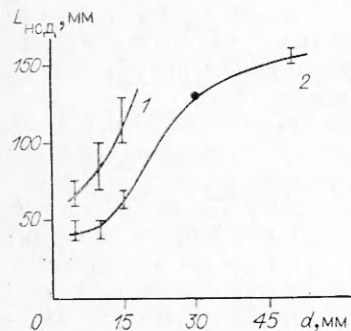


Рис. 4. Зависимость  $L_{нсд}(d)$  при поджигании от открытого (1) и закрытого торца (2).

крытого торца приводит к следующим изменениям на начальной стадии процесса: сигнал, регистрируемый датчиком давления вблизи воспламенителя, начинается пиком с амплитудой  $\sim 2$  МПа и длительностью  $\sim 1$  мс, который соответствует срабатыванию воспламенителя; затем давление спадает приблизительно до 200 кПа и лишь после этого начинается монотонный рост с характерным временем, близким времени нарастания при поджигании спиралью. Распространение пламени сразу начинается с высоких скоростей: на первых 10—15 мм длины заряда  $u = 90 \div 100$  м/с, затем 20—30 м/с и вновь начинает расти,  $L_{\text{исд}} = 50 \div 60$  мм.

Увеличение начальной плотности смеси при поджигании от закрытого торца приводит к ускорению развития взрывного процесса и уменьшению  $L_{\text{исд}}$ . Однако из-за того, что плексигласовая оболочка разрывается очень близко от места воспламенения (25—30 мм, смесь с  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>) на ранней стадии взрывного процесса, получить подробную информацию о нем не удалось. При замене мелкодисперсного ПХА на крупный со средним размером частиц около 0,5 мм взрывное развитие процесса не наблюдалось при  $l \leq 260$  мм. При этом большая часть исследуемой смеси выбрасывается из оболочки несгоревшей.

Приступая к обсуждению результатов экспериментов, прежде всего отметим роль газоотводящей трубки в опытах с поджиганием от открытого торца. Трубка обеспечивает перепад давления, необходимый для срыва послонного горения и возникновения пульсирующего конвективного горения за счет трения оттекающих продуктов горения о стенки. Кроме того, трубка исключает боковое расширение потока и здесь догорают взвеси частиц смеси, диспергируемые на стадии пульсирующего горения. В результате дополнительно повышается давление, вызывающее переход на вторую стадию — ускоряющееся конвективное горение. Последующее развитие взрывного процесса протекает одинаково для обоих вариантов поджигания.

В опытах с воспламенением от закрытого торца из-за высокой сжимаемости исследуемой смеси необходимо учитывать образование и рост полости вблизи точки поджига. Ранее [3] аналогичный эффект отмечен на мелкодисперсной цикриновой кислоте. Согласно кривой статического сжатия, при  $p \sim 1$  МПа увеличивается  $\rho_0$  исследуемой смеси в 1,5 раза. Поэтому уже небольшое повышение  $p$  при сгорании смеси вблизи воспламенителя вызывает уплотнение прилегающих слоев, которое сопровождается движением вещества, направленным от точки поджигания. Оценки движения пористого вещества проведены на основе кривой статического сжатия без учета трения о стенки с использованием кривой давление — время, полученной в эксперименте. Расчетная траектория границы полости, разделяющей уплотняемое пористое вещество и продукты горения, близка к траектории фронта свечения, регистрируемой в том же эксперименте на второй стадии взрывного процесса. Это позволяет предположить, что как и в опытах [3], несмотря на существенно более низкий порог возбуждения конвективного горения, скорость, с которой пламя проникает в глубь вещества по конвективному механизму, гораздо меньше видимой скорости распространения пламени (величина последней определяется переносной составляющей, равной скорости движения вещества). Таким образом, можно предположить, что конвективное горение охватывает лишь относительно тонкий слой вещества, примыкающий к границе полости, а большую часть зоны свечения занимает полость, заполненная газообразными продуктами горения и диспергированными частицами смеси.

Для подтверждения этого вывода проведены дополнительные опыты, в которых большая часть массы заряда заменялась на инертное вещество (смесь КС1 с полистиролом) с близкими плотностью и дисперсностью. При полной длине заряда 150 мм длина слоя исследуемой смеси, располагаемого вблизи воспламенителя, составляла 20—25 мм. Опыты проводились с поджиганием от открытого и закрытого торца и не обнаружили заметного влияния замены исследуемого вещества на инертное на стадиях, предшествующих возникновению вторичной волны, ни по фоторазверт-

кам, ни по записям давления. При этом фронт свечения распространялся с теми же скоростями, что и при отсутствии инертного вещества на расстоянии до 70 мм, которое заметно превышает длину слоя горючей смеси (20—25 мм). Это означает, что по мере развития взрывного процесса слой горючей смеси перемещается вместе с границей полости в направлении распространения пламени и расстояние, на которое проникает конвективное горение в глубь этого слоя, гораздо меньше полного расстояния, пройденного фронтом свечения вдоль канала оболочки.

Учитывая рост полости, можно предложить следующий гидродинамический механизм формирования вторичной волны, альтернативный предложенному в [4]. На начальных стадиях процесса, когда толщина слоя вещества, охваченного конвективным горением, относительно невелика, давление во фронте пламени мало отличается от его значения в полости, так как в результате оттока продуктов горения и диспергируемых частиц градиенты давления в горящем веществе выравниваются. При этом давление в веществе, охваченном горением, будет расти гораздо медленнее, чем в отсутствие разгрузки за счет стока, т. е. в отсутствие полости. Однако с течением времени, по мере увеличения толщины указанного слоя, будут достигнуты условия, когда разгрузка очага горения перестанет быть эффективной. Начиная с этого момента темп повышения  $p$  в области между границей полости и фронтом пламени резко возрастает и формируется вторичная волна.

Итак, проведенное исследование подтвердило, что повышенная взрывоопасность мелкодисперсных смесей ПХА с горючим обусловлена тем, что в этих смесях конвективное горение возбуждается при давлениях, лишь незначительно превышающих атмосферное. При поджигании от открытого торца переход от пульсирующего конвективного горения к ускоряющемуся связан с дополнительным повышением  $p$  в газоотводящей трубке при сгорании диспергированных частиц смеси.

Проведение экспериментов в плексигласовых оболочках, прикрепляемых к стальной пластине и прерывающих развитие взрывного процесса на стадии низкоскоростной детонации, позволило провести пьезометрические измерения и получить надежные данные по эволюции волн давления, которые были идентифицированы с волнами свечения, наблюдаемыми на фоторазвертках. Измерены характеристики вторичной волны, возникающей в зоне горения и обеспечивающей переход в детонацию по второму типу [2], изучено влияние мощности и расположения воспламенителя, длины и диаметра заряда, прочности оболочки, плотности смеси и дисперсности окислителя. При поджигании от закрытого торца на стадии, предшествующей возникновению вторичной волны, большую часть зоны свечения занимает полость, которая образуется и растет вблизи точки воспламенения из-за сильной сжимаемости смеси, заполняясь газообразными продуктами горения и диспергируемыми частицами. Конвективное горение охватывает лишь сравнительно тонкий слой смеси, примыкающий к границе полости. Можно предположить, что вторичная волна возникает тогда, когда при некоторой толщине горящего слоя гидродинамическая разгрузка в полость более не обеспечивает эффективное выравнивание градиента давления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв.— М.: Наука, 1973.
2. Коротков А. И., Сулимов А. А. и др. ФГВ, 1969, 5, 3, 315.
3. Храповский В. Е., Сулимов А. А., Ермолаев Б. С. // Докл. IV Всесоюз. совещания по детонации.— Телави, 1988.— Т. 1.
4. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А. и др. ФГВ, 1988, 24, 1, 65.

г. Москва

Поступила в редакцию 20/II 1989