

8. А. Сакурай.— В сб.: Взрывающиеся проволоочки. М.: ИЛ, 1963.
9. В. В. Адушкин, А. И. Коротков. ПМТФ, 1961, 5.
10. Х. С. Кестейбойм, Г. С. Росляков, Л. А. Чудов. Точечный взрыв. Методы расчета. Таблицы. М.: Наука, 1974.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И СТРУКТУРА ВОЛНЫ НЕИДЕАЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИИ В ПРЕССОВАННЫХ СМЕСЕВЫХ СИСТЕМАХ

В. Ф. Мартынюк, А. А. Сулимов, В. Ф. Дубовицкий

(Москва)

В работе [1] показано, что критический диаметр детонации $d_{кр}$ смесевых систем (аммотол, динамон) повышается с ростом плотности заряда ρ . Такая зависимость $d_{кр}$ от ρ для смесевых ВВ принципиально отличается от аналогичной зависимости для мощных индивидуальных ВВ, у которых $d_{кр}$ уменьшается с ростом ρ [2] и возрастает лишь при приближении к плотности монокристалла [3]. Критический диаметр детонации увеличивается с ростом плотности во всем интервале ρ для окислителей (перхлорат аммония (ПХА) и нитрат аммония), для смесей окислитель — инертное горючее и для слабых индивидуальных ВВ (нитрогуанидин, динитротолуол, нитрофенол) [4]. Скорость детонации D зарядов фиксированного диаметра смесевых и слабых ВВ сначала увеличивается с ростом плотности, достигает максимума и затем уменьшается при приближении плотности заряда к критической. Для мощных индивидуальных ВВ скорость детонации растет с плотностью заряда во всем диапазоне плотностей. Такие зависимости $d_{кр}$ от ρ и D от ρ получены для ПХА [5, 6], смесей ПХА с воском [7], алюминием [8], сажой, уротропином и мочевиной [9, 10], полиметилметалкрилатом (ПММА) и полистиролом [11]. Одинаково во всех работах измерялась только скорость детонации. Кроме того, недостаточно подробно исследована область высоких плотностей заряда.

В данной работе изучены закономерности распространения неидеальной детонации в прессованных зарядах стехиометрической смеси ПХА/ПММА (85/15) вблизи критических условий в интервале плотностей, где скорость детонации падает с ее ростом. Скорость распространения детонации составляла $\sim 3\text{—}4$ км/с и была близка к значениям, характерным для низкоскоростной детонации в мощных индивидуальных ВВ [12]. Особенность состоит в том, что если низкоскоростная детонация распространяется в зарядах, заключенных в оболочку, то в смесевых ВВ низкие скорости распространения детонации наблюдаются в открытых безоболочечных зарядах. Это позволяет использовать электромагнитный метод для исследования структуры детонационной волны.

Тщательно высушенный технический ПХА измельчался в фарфоровой мельнице и просеивался через сито с просветом ячеек 100 мкм. Средний массовый размер частиц просеянного ПХА составлял 90 мкм (около 25% частиц имели размер меньше 25 мкм). ПХА смешивался в смесителе с ПММА, имеющим размер частиц 4 мкм. Заряды состояли из прессованных таблеток длиной не более диаметра. Плотность заряда определялась с точностью 0,5%. Скорость детонации измерялась с помощью ждущего фоторегистратора, ионизационными датчиками и по времени прохождения детонационным фронтом двух плеч электромагнитного датчика.

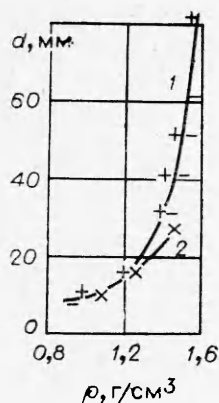


Рис. 1. Зависимость критического диаметра детонации от плотности.
Размер частиц ПХА; мкм: 1 — 90; 2 — 15 [11].

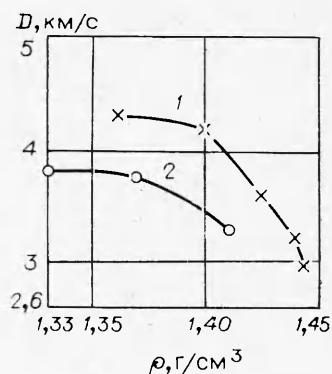


Рис. 2. Зависимость скорости детонации смеси от плотности для зарядов диаметром 50 (1) и 40 мм (2).

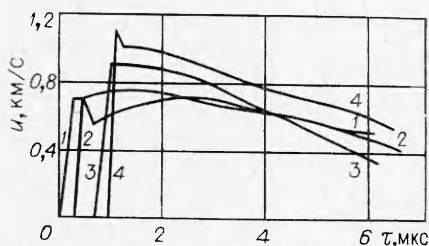


Рис. 3. Профили массовой скорости в веществе на расстоянии 40 (1), 60 (2), 80 (3) и 100 мм (4) от места инициирования. Заряд диаметром 50 мм и плотностью 1,41 г/см³.

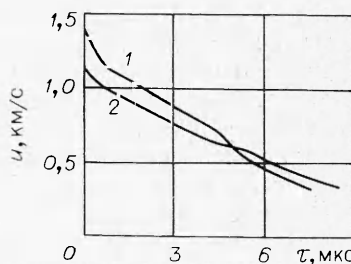


Рис. 4. Профили массовой скорости на границе раздела исследуемое вещество — плексиглас на расстоянии 160 мм от места инициирования. Заряды диаметром 40 мм и плотностью 1,33 (1) и 1,41 г/см³ (2).

Профиль массовой скорости $u(\tau)$ измерялся П-образным электромагнитным датчиком, размещенным, как правило, в самом исследуемом веществе либо на границе раздела исследуемое вещество — плексиглас. Электромагнитный метод измерения подробно описан в [13]. В случае измерения $u(\tau)$ в самом исследуемом веществе к торцу цилиндрического заряда на вакуумной смазке присоединялась сборка из трех прямоугольных пластин исследуемого вещества, в которые заделывался электромагнитный датчик. При определении $u(\tau)$ на границе раздела датчик монтировался на трех пластинах, вырезанных из листового плексигласа. Часть заряда с электромагнитным датчиком находилась в центре зазора электромагнита шириной 200 мм. Напряженность магнитного поля составляла 400 Э. Неоднородность поля на длине 100 мм при диаметре наконечников полюсов 220 мм составляла 3%. Датчик изготовлялся из алюминиевой фольги толщиной 0,15 и шириной 10 мм. Второе плечо датчика находилось на расстоянии 20—40 мм от первого. Сигнал с электромагнитного датчика записывался на осциллограф ОК-33, при этом на входе осциллографа параллельно датчику ставилось согласующее сопротивление.

На рис. 1 показана полученная зависимость критического диаметра детонации смеси ПХА/ПММА от плотности. В экспериментах длина заряда во всех случаях составляла не менее 200 мм. Ход кривой 2 подтверждает отмеченный ранее факт уменьшения критического диаметра с

уменьшением размера частиц [11]. Критический диаметр детонации возрастает с увеличением плотности особенно сильно при относительной плотности выше 0,8.

Зависимость скорости детонации от плотности для различных зарядов показана на рис. 2. Для данной системы характерно сильное уменьшение D при приближении плотности заряда к критической. При изменении ρ менее чем на $0,1 \text{ г/см}^3$ D зарядов с $d=50 \text{ мм}$ изменяется от 4,3 до 2,9 км/с. Это приводит к разбросу в данных из-за небольшой разницы зарядов по плотности или при работе со смесями из различных партий.

Важен вопрос о стационарности и устойчивости процесса в условиях, близких к критическим. Для проверки стационарности процесса на составе с $\rho=1,43 \text{ г/см}^3$ и $d=50 \text{ мм}$ изучено изменение скорости детонации по длине заряда до 160 мм при трех различных значениях амплитуды инициирующей ударной волны $p_{ин}$. Применялись активные заряды смеси ТНТ/NaCl $l=40 \text{ мм}$, $d=40 \text{ мм}$ и $\rho=1,34 \text{ г/см}^3$ с содержанием ТНТ 40, 50 и 100%, что соответствовало значениям $p_{ин}=4 \cdot 10^3$, $5 \cdot 10^3$ и $14 \cdot 10^3$ МПА. Активный заряд инициировался с помощью взрывной линзы. Скорость детонации в пассивном исследуемом заряде измерялась ионизационными датчиками на базах 40 мм. Показано, что D как при сильном, так и при слабом инициировании стремилась сверху или снизу к одинаковому стационарному значению. Однако детонация выходит на стационарный режим на значительном расстоянии (120 мм) от места инициирования. Об этом свидетельствует и совпадение профилей массовой скорости, снятых на расстоянии 120 и 160 мм от места инициирования (профили снимались на границе раздела исследуемое вещество — плексиглас).

На стадии выхода на стационарный режим параметры детонационной волны меняются плавно, без скачков. В качестве примера на рис. 3 показаны профили массовой скорости в веществе на разных расстояниях от места инициирования (инициирование таблеткой смеси ТНТ/NaCl 35/65 плотностью $1,36 \text{ г/см}^3$). Для наглядности профили сдвинуты по времени и размещены рядом. Фактическая задержка между фронтами соседних записей составляет 7—8 мкс. Особенность некоторых записей — наличие «пичков» на фронте, которые наблюдаются нерегулярно, хотя и повторяются в других условиях эксперимента (рис. 4). Возможно, наличие или отсутствие «пичков» связано с характером заделки датчиков. Из рис. 4 видно, что при увеличении ρ и уменьшении D профиль массовой скорости выполаживается, что свидетельствует о более медленном тепловыделении за фронтом. Особенно наглядно этот эффект проявляется на зарядах больших диаметров (рис. 5, на котором показаны профили массовой скорости, снятые непосредственно в исследуемом веществе). Так, для заряда диаметром 50 мм и плотностью $1,36 \text{ г/см}^3$, детонирующего со скоростью 4,3 км/с, профиль массовой скорости напоминает профиль $u(\tau)$ детонационной волны мощных индивидуальных ВВ. При приближении к критическим условиям детонации ($\rho=1,43 \text{ г/см}^3$, $D=3,6 \text{ км/с}$) профиль выполаживается, на нем не видно хипика. Для заряда диаметром 80 мм и плотностью $1,55 \text{ г/см}^3$, детонирующего со скоростью 3,53 км/с, в течение 6 мкс уменьшение массовой скорости не превышает 15%. В этом случае максимальная массовая скорость на фронте волны (осциллограмма на рис. 6 получена при постановке датчика в исследуемое вещество) равна 1,00 км/с. Согласно оценкам, за время записи боковая волна разрежения не достигает середины заряда, где расположен датчик. Таким образом, за время ~ 10 мкс химическое превращение еще не закончилось, при этом время и ширина зоны химической реакции при детонации высокоплотных смесей в несколько раз превышают аналогичные характеристики детонации мощных индивидуальных ВВ [14].

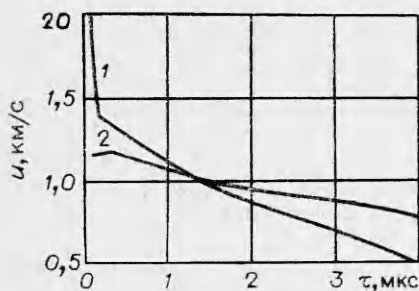


Рис. 5. Профили массовой скорости стационарной детонации для зарядов диаметром 50 мм и плотностью 1,36 (1) и 1,43 г/см³ (2).

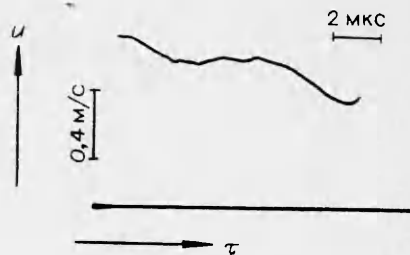


Рис. 6. Осциллограмма профиля массовой скорости стационарной детонации в заряде диаметром 80 мм и плотностью 1,55 г/см³ (время записи 9,5 мкс).

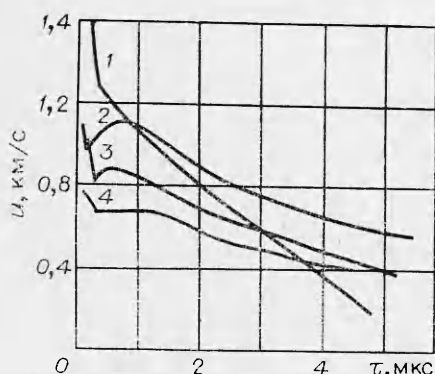


Рис. 7. Профили массовой скорости в веществе на расстоянии 80 мм от места инициирования взрывной линзой. ρ , г/см³: 1 — 1,35, 2 — 1,55, 3 — 1,50, 4 — 1,55; d , мм: 1 — 40, 2 — 60, 3, 4 — 50.

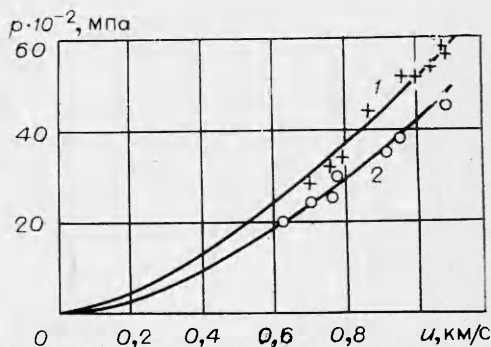


Рис. 8. Ударные адиабаты смеси ПХА/ПММА 85/15 плотностью 1,550 (1) и 1,425 г/см³ (2). Линия — расчет.

Полученные экспериментальные результаты указывают также на немонотонный, стадийный характер тепловыделения в детонационной волне. На рис. 6 видны две зоны тепловыделения, которые разделены по времени на 6 мкс и по пространству на 18 мм. Стадийный характер тепловыделения предполагался ранее при теоретическом рассмотрении низкоскоростной детонации [15] и детонации смеси окислитель — горючее [16]. При этом в [16] разделялись стадии горения зерен ПХА и разложения связи с последующим диффузионным взаимодействием продуктов разложения. Результаты данной работы не противоречат этим предположениям.

Можно оценить долю энергии, выделяющейся в зоне реакции, используя соотношение $\Delta Q/Q = (D/D_{ид})^2$. Принимая за основу полученное в [16] значение идеальной скорости детонации для смеси ПХА — полиуретан 90/10 $D_{ид} = 6,83$ км/с и $D = 3,53$ км/с, получим, что до плоскости Чепмена-Жуге выделяется $\sim 25\%$ энергии.

В опытах, где диаметр заряда меньше критического, детонация затухает. Однако при сравнении затухания ударной волны в инертном веществе и затухания детонации в исследуемой смеси при сильном инициировании видно, что изменение параметров на фронте волны в последней системе происходит значительно медленнее. На рис. 7 показаны профили массовой скорости в смеси на расстоянии 80 мм от места инициирования

при инициировании взрывными линзами. Видно, что даже для заряда диаметром 50 мм с плотностью выше критической ($\rho = 1,55 > \rho_{кр} = 1,45$ г/см³) на фронте волны значение массовой скорости равно 0,76 км/с, что соответствует давлению $3 \cdot 10^3$ МПа (скорости детонации, измеренные на базе 20 мм, составляют 4,08, 3,40, 3,56 и 2,82 км/с для кривых 1—4 соответственно). В инертной среде (порошке насыпной плотности, плексигласе) давление в ударной волне на таких расстояниях падает более чем на порядок [1, 17].

Измеренные в работе профили массовой скорости в веществе позволяют рассчитать давление на переднем фронте волны и построить ударные адиабаты вещества. Принималось, что фронт детонации плоский, так как торцевая фоторазвертка показала, что радиус кривизны фронта составляет 100—150 мм. Расчет давления проводился по формуле $p = \rho u D$. На рис. 8 представлены расчетные ударные адиабаты смеси, и точками нанесены экспериментальные значения. Ударные адиабаты пористой смеси рассчитаны из ударной адиабаты непористой смеси при пренебрежении пористостью вещества за фронтом волны, как предположено в [18]. Ударные адиабаты непористой смеси ПХА/ПММА 85/15 получены по методике [19]. Видно хорошее согласие экспериментальных и теоретических значений.

Поступила в редакцию
20/VIII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев.— В сб.: Вопросы теории взрывчатых веществ. М.: Изд-во АН СССР, 1947.
2. В. К. Боболев.— В сб.: Физика взрыва, № 2. М.: Изд-во АН СССР, 1953.
3. А. Я. Апин, И. Ф. Велина. Тез. докл. Второго Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву. М.: Наука, 1969.
4. Donna Price. 11-th Symp. (International) on Comb. Pittsburgh, 1967.
5. W. H. Andersen, R. E. Pesant. 8-th Symp. (International) on Comb. Baltimore, 1962.
6. Donna Price, A. R. Clairmont, Jr., I. Jaffe. Comb. Flame, 1967, 11, 5.
7. Donna Price, A. R. Clairmont, Jr., J. O. Erkman. Comb. Flame, 1971, 17, 3.
8. Donna Price, A. R. Clairmont, Jr., J. O. Erkman. Comb. Flame, 1973, 20, 3.
9. Л. И. Акимова, Л. Н. Стесик, А. Я. Апин. ФГВ, 1967, 3, 3.
10. Л. И. Акимова, Л. Н. Стесик. ФГВ, 1976, 12, 2.
11. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков и др. ФГВ, 1968, 4, 2.
12. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
13. А. Н. Дремин, К. К. Шведов, В. А. Беретенников.— В сб.: Взрывное дело, № 52/9. М.: ГИТИЛ по горному делу, 1963.
14. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
15. B. A. Khasainov, B. S. Ermolaev et al. Acta Astronautica, 1979, 6, 557.
16. P. K. Salzman, O. R. Irwin, W. H. Andersen. AIAA J., 1965, 3, 12.
17. Minoru Lida, Shuzo Fujiwara, Masao Kusakabe. J. Indust. Explos. Soc., 1972, 33, 5.
18. Б. С. Ермолаев, Б. А. Хасанов, А. И. Коротков. ФГВ, 1975, 11, 2.
19. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов, И. М. Воскобойников.— В сб.: Взрывное дело, № 68/25. М.: Недра, 1970.