

13. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
14. С. J. Taylor. Scientific Papers Sir G. J. Taylor. V. III. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1963, p. 309.
15. Eyring a. o. Chem. Rev., 1949, 45, 69.
16. Л. Н. Акимов, А. Я. Апин. ФГВ, 1967, 3, 2, 197.
17. В. Ф. Лобанов, Ю. И. Фадеев. — В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 7, Новосибирск, ИГ СО АН СССР, 1971.
18. К. П. Станюкович. Неустойчивые движения сплошной среды. М., «Наука», 1971.
19. Л. В. Овсянников. Лекции по основам газовой динамики. Новосибирск, НГУ, 1967.
20. R. A. Stager. H. G. Drickamer. Phys. Rev., 1969, 132, 1, 124.
21. В. Н. Жарков, П. А. Калинин. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М., «Наука», 1968.
22. Н. М. Кузнецов, К. К. Швецов. ФГВ, 1967, 4, 2, 203.
23. М. В. Жерноклетов, В. Н. Зубарев, Г. С. Телегин. ПМТФ, 1969, 4, 127.

УДК 662.3

СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В АММОНИТЕ 6ЖВ

В. А. Васильев, Л. И. Альбов

Смесевые взрывчатые вещества по своим детонационным свойствам обладают рядом известных особенностей по сравнению с индивидуальными ВВ. Как правило, для смесевых ВВ характерны относительно большие значения критического диаметра, низкая чувствительность к ударной волне, наличие участка возрастания критического диаметра с увеличением плотности заряда, большое различие между критическим диаметром и диаметром, соответствующим идеальной детонации.

Наиболее изучена группа смесевых ВВ на основе аммиачной селитры с добавлением мощных ВВ типа тротила и гексогена, представителями этой группы являются, например, штатные ВВ аммонит 6ЖВ и аммонит ПЖВ-20. В работе [1] установлено увеличение критического диаметра с ростом начальной плотности. Широкое экспериментальное исследование аммонитов в большом интервале плотностей проведено в работах [2—5]. В частности, в них отмечены такие интересные особенности детонации аммонитов, как уменьшение массовой скорости в точке Жуге с ростом начальной плотности, а также быстрое падение массовой скорости за химическим пиком. По общему мнению, аномальные по сравнению с индивидуальными ВВ детонационные свойства аммонитов связаны с догоранием продуктов распада селитры и тротила при их смешении в зоне реакции.

В данной работе исследована детонация штатного аммонита 6ЖВ в интервале насыпных плотностей 0,8—1,1 г/см³. В опытах использовались цилиндрические заряды диаметром 50 мм и длиной не менее 130 мм в оболочках из картона, винипласта толщиной 6,5 мм и песка ~30 мм, инициирование проводилось плосковолновой линзой. Электромагнитным методом [6] получены профили массовой скорости $u(t)$, сигналы датчиков регистрировались с помощью осциллографа ОК-33 на развертках 3 и 10 мкс.

Для исключения влияния датчиков на запись быстрого изменения u в зоне реакции толщина алюминиевой фольги менялась от 0,035 до 0,2 мм. Сопоставление осциллограмм записи профиля $u(t)$ при одинаковых начальных плотностях, но при разных толщинах датчиков показало, что датчики из толстой фольги искажают запись химпика,

в частности, завышают его длительность в 1,5—2 раза и занижают максимальную массовую скорость. Экстраполяция данных к нулевой толщине позволила учесть погрешности, связанные как с инерционностью датчика, так и с задержкой инициирования следующего за ним слоя ВВ.

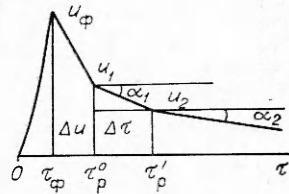


Рис. 1

Характер записи массовой скорости при развертке 3 мкс показан на рис. 1. Применение тонких датчиков позволило разрешить в записях зону нарастания массовой скорости на переднем фронте, длительность которой τ_{ϕ} на порядок превышала аппаратный завал осциллографа. Эта зона соответствует, по-видимому, ударному сжатию насыщенного аммонита. За точкой максимума следует резкое уменьшение скорости, обусловленное энерговыделением в ходе быстрой реакции, затем химпик сменяется более плавным изменением массовой скорости. В табл. 1

Таблица 1

Материал оболочки	ρ_0 , г/см ³	D , км/с	u_{ϕ}^0 , км/с	u_1 , км/с	τ_{ϕ}^0 , мкс	τ_p^0 , мкс	p_{cp} , кбар	a , мм
Картон	0,81	3,85	3,14	1,76	0,24	0,33	76,4	0,46
»	0,83	3,87	3,05	1,73	0,21	0,31	76,8	0,46
Винипласт	0,83	3,91	3,18	1,81	0,21	0,30	80,5	0,42
Песок	0,83	4,08	3,24	1,76	0,17	0,24	86,4	0,40
Картон	0,94	4,03	2,65	1,51	0,18	0,26	79,7	0,50
Винипласт	0,94	4,11	3,05	1,68	0,18	0,23	90,2	0,39
Песок	0,94	4,21	2,85	1,59	0,19	0,23	87,1	0,45
Картон	1,1	4,22	2,26	1,39	0,12	0,19	85,1	0,46

приведены усредненные по 6—10 записям результаты измерений для четырех значений начальной плотности и разных оболочек. Значения максимальной массовой скорости u_{ϕ} , времени нарастания τ_{ϕ} и времени реакции τ_p экстраполированы к нулевой толщине датчика (данные по временам согласуются с приведенными в работе [3], если учесть, что там время реакции соответствует $\sim 1,5(\tau_{\phi} + \tau_p)$). Кроме того, рассчитаны

значения среднего давления в зоне энерговыделения $p_{cp} = \rho_0 D \frac{u_{\phi}^0 + u_1}{2}$

и ширины зоны реакции $a = (D - \bar{u}) \tau_p^0$, где $\bar{u} = \frac{u_{\phi}^0 + u_1}{2}$.

На рис. 2, а построена зависимость, характеризующая изменение скорости энерговыделения в химпике от давления. Из графика видно, что скорость реакции растет с увеличением давления почти линейно. Такой же ход зависимости скорости реакции от давления наблюдается и у ряда индивидуальных ВВ [7].

Характер изменения массовой скорости в конце химпика в зависимости от плотности заряда показывает, что увеличение массы оболочки, ограничивающей

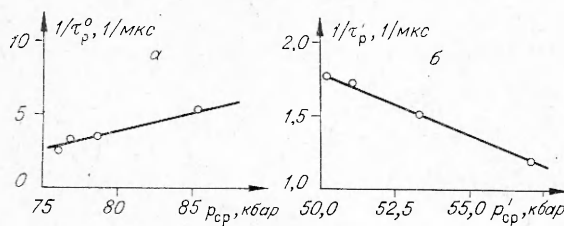


Рис. 2

боковой разлет продуктов детонации, увеличивает массовую скорость для каждой начальной плотности. Хотя зависимость $u_1(\rho_0)$ остается убывающей, но скорость убывания $du_1/d\rho_0$ уменьшается.

Таблица 2

ρ_0 , г/см ³	D км/с	u_1 , км/с	u_2 , км/с	α_1 , мм/мкс ²	α_2 , мм/мкс ²	τ_p^0 , мкс	τ_p' , мкс	a' , мм	$p_{ср}'$, кбар
0,81	3,85	1,76	1,47	0,51	0,30	0,33	0,57	1,28	50,2
0,83	3,87	1,73	1,44	0,49	0,29	0,31	0,59	1,35	50,8
0,94	4,03	1,51	1,28	0,39	0,27	0,25	0,67	1,76	53,0
1,1	4,22	1,39	1,07	0,37	0,21	0,19	0,85	2,54	57,2
0,87	4,58	1,15	—	—	0,29	0,37*	—	—	—
1,1	5,35	1,39	—	—	0,22	0,18*	—	—	—
0,93	5,52	1,71	—	—	0,24	0,25**	—	—	—
1,1	6,23	1,78	—	—	0,20	0,16**	—	—	—

* Тротил.
** Гексоген.

Применение тонких датчиков, дающих более подробную информацию о структуре зависимости $u(t)$, позволило выявить новую особенность профиля массовой скорости. При анализе осциллограмм проводилось измерение наклона профиля $\frac{du}{dt}$ в области медленного уменьшения массовой скорости за химпиком. На осциллограммах, полученных с датчиками толщиной 0,035—0,08 мм, четко различаются два участка с разными значениями наклона углов α_1 и α_2 (см. рис. 1). Сразу за химпиком имеется участок сравнительно быстрого падения массовой скорости, причем профиль в пределах этого участка почти линейный, т. е. $\alpha_1 = \text{const}$. После плавного перехода длительностью 0,1—0,2 мкс наблюдается более плавное уменьшение u с почти постоянной скоростью падения, характеризуемой углом α_2 . Значения α_1 и длительности первого участка в разных опытах при одной и той же начальной плотности оставались постоянными с точностью 10—20%.

В табл. 2 приведены результаты измерений, усредненные по 5—8 записям, для тех же значений начальной плотности что и в табл. 1. Наряду с наклонами α_1 и α_2 измерялись длительность τ_p' и массовая скорость u_2 в конце участка, рассчитаны также среднее давление $p_{ср}' = \rho_0 D \frac{u_1 + u_2}{2}$ и длина участка $a' = \left(D - \frac{u_1 + u_2}{2} \right) \tau_p'$. Значения α_1 , α_2 и τ_p' , полученные для зарядов в массивных оболочках, лежат в пределах разброса.

Из табл. 2 видно, что для всех исследованных начальных плотностей наклон α_2 приблизительно в 2 раза меньше, чем α_1 . Для сравнения в последних четырех строках таблицы приведены наклоны $\frac{du}{dt}$ за химпиком в тротиле и гексогене, полученные в аналогичной постановке опытов. Значения $\frac{du}{dt}$ близки к величине α_2 при близких плотностях. Таким образом, наклон профиля $u(t)$ в области медленного падения соответствует обычному разлету продуктов детонации в волне разрежения. Влияние бокового разлета на наклон профиля было несущественным, что показали опыты с массивными оболочками.

С увеличением начальной плотности наблюдается уменьшение наклона α_1 на участке быстрого падения массовой скорости, при этом его длительность τ_p' растет. Увеличение давления в исследованном интервале плотностей ведет к быстрому росту τ_p' (см. рис. 2, б, на котором приведена зависимость $(\tau_p')^{-1}$ от среднего давления на этом участке).

Имеющиеся в литературе данные регистрации $u(t)$ в аммонитах электромагнитным методом [2—4] относятся в основном к сравнительно высоким плотностям зарядов ($> 1,3$ г/см³). Отдельные результаты для насыпных плотностей получены с использованием датчиков

толщиной 0,15—0,20 мм. При больших плотностях разность наклонов мала и практически не регистрируется, при насыпных плотностях запись химпика от толстых датчиков почти полностью перекрывает участок большого наклона профиля $u(t)$, в связи с чем указанную разность наклонов трудно заметить.

Из табл. 1 видно, что ширина зоны реакции, определяемая по химпику, практически не зависит от плотности заряда. В то же время известно, что при малых плотностях критический диаметр аммонитов растет с увеличением плотности. Эти факты находятся в противоречии с соотношением Харитона $d_{кр} \sim a$. Если взять из [8] выражение $a = (0,1—0,2)d_{кр}$, то для критического диаметра при насыпных плотностях получатся значения 2,3—4,6 мм, в то время как критические диаметры аммония 6ЖВ для этих плотностей составляют 8—15 мм. Таким образом, сопоставление ширины зоны реакции с критическим диаметром обнаруживает расхождение как в характере зависимости от плотности, так и в абсолютных значениях a и $d_{кр}$.

Исходя из полученных данных и общепринятых представлений, можно предположить, что химическое превращение аммонита в детонационной волне проходит в две стадии. В первой происходит взрывное разложение тротила и селитры без существенного смешения промежуточных продуктов реакции, быстрая реакция сопровождается резким уменьшением массовой скорости в химпике. Участок более плавного спада скорости (см. рис. 1) соответствует вторичной реакции догорания продуктов распада тротила и селитры при их взаимном смешении. В пользу этого предположения говорят следующие факты:

1) зависимость времени реакции τ_p^0 от давления в химпике аналогична известным соотношениям для индивидуальных ВВ, т. е. τ_p^0 уменьшается с увеличением давления. Такая зависимость характерна для мономолекулярного разложения ВВ в детонационной волне;

2) длительность участка 1—2, обозначенная τ_p (см. рис. 1), растет с увеличением давления. Это согласуется с известными представлениями об уменьшении скорости диффузии с ростом давления и плотности. Если высказанное предположение верно и на участке 1—2 действительно происходит реакция, то на основе полученных данных можно объяснить ряд особенностей в детонационных свойствах аммонитов. Ширина зоны реакции должна определяться суммой $a+a'$, где $a = \left(D - \frac{u_{\Phi}^0 + u_1}{2}\right) \tau_p^0$, $a' = \left(D - \frac{u_1 + u_2}{2}\right) \tau_p'$. Из табл. 2 видно, что ширина зоны заметно увеличивается с ростом начальной плотности. Это согласуется с увеличением критического диаметра при повышении плотности. По значениям ширины зоны реакции можно оценить величину критического диаметра: $d_{кр} = (5 \div 10)a$. Для плотности 1 г/см³ оценка дает $d_{кр} \approx (10 \div 20)$ мм, хорошо согласующееся с экспериментом.

Большие значения ширины зоны вторичной реакции объясняют также большой разрыв у аммонитов между $d_{кр}$ и $d_{пр}$. Медленный выход скорости детонации на идеальное значение связан с малым энерговыделением в зоне вторичной реакции, чему соответствует небольшой наклон du/dt на участке 1—2 (см. рис. 1).

В заключение приведем оценку наибольшего возможного значения предельных плотностей аммонита 6ЖВ, соответствующих максимумам зависимостей $d_{кр}(\rho_0)$ и $D(\rho_0)$. На рис. 3, по нашим данным построена зависимость $1/\tau_p(\rho_0)$, характеризующая изменение скорости вторичной реакции при увеличении начальной плотности. Точка пересечения экстраполированной прямой с осью абсцисс дает значение плотности, при которой прекращается вторичная реакция. При дальнейшем увеличении плотности реакция будет состоять из одной стадии взрывного

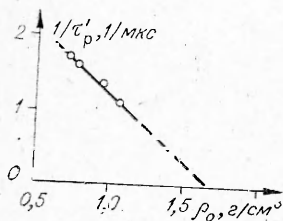


Рис. 3

разложения, происходящего в химпике. Критический диаметр при этом должен уменьшаться с ростом ρ_0 в соответствии с уменьшением ширины зоны a (см. табл. 1). Даваемое этой оценкой значение $\rho_0 \approx 1,7 \text{ г/см}^3$ есть верхняя граница действительных предельных плотностей, так как при малых диаметрах медленное энерговыделение во второй стадии реакции не способно конкурировать с боковым разлетом при значительно меньших плотностях, поэтому требование обращения в ноль скорости вторичной реакции

является слишком строгим.

Авторы приносят благодарность Л. В. Дубнову за содействие в проведении работы.

ИФЗ АН СССР

Поступила в редакцию
9/1 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев. — В сб.: Вопросы теории ВВ. Вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1947.
2. А. Н. Дремин, К. К. Шведов, В. А. Веретенников. — В сб.: Взрывное дело, № 52/9. М., 1963.
3. А. Н. Дремин, Л. В. Дубнов и др. ФТПРПИ, 1971, 1.
4. А. Н. Дремин и др. ФТПРПИ, 1971, 4.
5. Л. В. Дубнов, Э. В. Постниченко. — В сб.: Взрывное дело, № 52/9. М., 1963.
6. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. Методы исследования процессов горения и детонации. М., «Наука», 1969.
7. Л. И. Альбов, В. А. Васильев. Труды МФТИ, серия «Аэромеханика. Процессы управления». М., 1974.
8. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.

УДК 534.222.2:662.398

О КРИТИЧЕСКИХ ДИАМЕТРАХ ДЕТОНАЦИИ ВВ С ИНЕРТНЫМИ ДОБАВКАМИ

Г. В. Димза

Исследовались критические диаметры детонации взрывчатых композиций на основе гексогена, октогена и тротила с разным содержанием в них твердых инертных наполнителей и воздуха. Оценивалось влияние на развитие детонации плотности и пористости зарядов. Последнее связывалось с возможностью поджигания частиц ВВ газообразными продуктами реакции [1] в процессе распространения детонации по заряду. Ранее [2] отмечалось воздействие горячих газов при возбуждении детонации передачей через воздушный промежуток. Было показано, что нанесение слоя флегматизатора на зерна ВВ или помещение слоя воды на торец пассивного заряда приводит к существенно уменьшению расстояния передачи детонации. Можно было предположить, что механизм возбуждения детонации, в известной мере аналогичный предложенному А. Я. Апиным механизму взрывного горения [1], может наблюдаться и у исследуемых в настоящей работе взрывчатых систем.

Для изучения критических диаметров детонации применялись порошки взрывчатых веществ со средним размером частиц около 0,1 мм.