

4. H. Eyring, R. E. Powell a. o. Chem. Revs., 1949, 45.
5. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков и др. 1950, ЖФХ, 1950, 37, 1.
6. Basset. Compt. Rend., 1950, 14.
7. А. Я. Апин, Л. Х. Болховитинов. Докл. АН СССР, 1959, 124, 2.
8. А. Я. Апин, Л. Н. Стесик. Сб. «Физика взрыва», № 3, Изд-во АН СССР, 1955.
9. А. Я. Апин, Н. Ф. Велина. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, 1967.
10. А. Н. Дремин, К. К. Шведов, В. А. Веретенников. Сб. «Взрывное дело», № 52/9, Госгортехиздат, 1963.
11. К. К. Шведов, А. Н. Дремин. Сб. «Взрывное дело», № 60/13, «Недра», 1966.
12. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
13. Е. Н. Александров, В. А. Веретенников и др. ФГВ, 1968, 4, 3.
14. В. А. Веретенников, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1967, 3, 1.
15. D. W. Woodhead, H. Titman. Explosivstoffe, 1965, 5—6.
16. Е. Н. Александров, В. А. Веретенников и др. ФГВ, 1967, 3, 4.
17. C. L. Mader. Phys. Fluids, 1963, 6.
18. C. L. Mader. Phys. Fluids, 1965, 8.
19. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев и др. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
20. Ф. Боуден, А. Иоффе. Быстрые реакции в твердых веществах. ИЛ, 1962.
21. J. Zipp. J. Chem. Phys., 1962, 36, 7.
22. А. Г. Мержанов, В. В. Барзыкин, В. Т. Гонтковская. Докл. АН СССР, 1963, 148, 2.
23. A. G. Mezhanov. Combustion and Flame, 1966, 10, 4.
24. В. А. Веретенников, А. Н. Дремин, К. К. Шведов. Тр. 1-го Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. М., 1968.
25. А. Н. Дремин, В. С. Трофимов. Тр. 1-го Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. М., 1968.
26. А. Н. Дремин, В. С. Трофимов. ФГВ, 1966, 2, 3.

УДК 662.215.1

О МАЛОЙ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ПОРОШКООБРАЗНЫХ ВВ

А. К. Парфенов, И. М. Воскобойников
(Москва)

Вид зависимости скорости детонации D от диаметра d заряда определяется кинетикой химической реакции в детонационной волне. Установление количественных закономерностей затруднено сложностью решения газодинамической задачи о неоднородном течении вещества в наличии тепловыделения, зависящего от распределения параметров в потоке. Определенные возможности выяснения механизма химического разложения в детонационной волне порошкообразных ВВ, как будет показано в настоящей работе, дает анализ зависимостей $D(d)$ для монодисперсных индивидуальных ВВ, а также для модельных промышленных ВВ на основе NH_4NO_3 с твердой или жидкой чувствительной компонентой.

Имеется большое количество указаний на то, что заряды вторичных ВВ при слабом инициирующем импульсе могут детонировать со скоростями, в 2—4 раза отличающимися от нормальных [1, 2]. Особенно подробно это явление изучено применительно к жидким нитроэфирам (в частности, НГЦ), в которых низкоскоростные режимы детонации устойчиво распространяются на значительные длины [3—5]. Для большинства же остальных ВВ вплоть до недавнего времени можно было найти лишь отдельные описания условий получения детонационных режимов с пониженными скоростями, которые на ограниченных длинах

заряда переходили в нормальные, причем, как правило, не ставился даже вопрос об их стационарности.

Существование областей стационарной детонации с малой скоростью при инициировании детонации монодисперсных порошков вторичных ВВ ударными волнами амплитудой в несколько килобар описано в работе [6]. Стационарность распространения таких режимов исследовалась как путем изменения длины заряда (наибольшая длина заряда, на которой наблюдалась устойчивая малая скорость детонации, составляла $\sim 0,5$ м, что соответствует ~ 25 диаметрам), так и изменением характера инициирования: в пределах точности измерения (~ 100 м/сек) малые скорости детонации в этой области не зависят от мощности инициирования (если, конечно, она не превышает значения, при котором происходит переход на нормальный детонационный режим). Область устойчивости низкоскоростной детонации ограничена снизу значением критического диаметра этого режима d_{k_1} , сверху — некоторым значением диаметра заряда d_* , зависящего от дисперсности ВВ и оболочки, окружающей заряд. При $d > d_*$ низкоскоростная детонация неустойчива и претерпевает переход к нормальной детонации (плавный или скачкообразный). Примечательным является то обстоятельство, что переход к нормальным детонационным режимам вблизи $d = d_*$ происходит для данного ВВ независимо от его дисперсности при одном и том же значении скорости детонации D_* . Величины D_* у разных ВВ отличаются незначительно.

Скорости детонации на пределе распространения низкоскоростного режима D_{k_1} , также не зависят для данного ВВ от его дисперсности. Если параметры инициирующей ударной волны достаточно высоки, то низкоскоростные режимы часто не наблюдаются вовсе. Критический диаметр нормальной детонации d_{k_2} меньше (гексоген, тротил) или примерно равен (тетрил, тэн) значению d_* , однако в разных ВВ он может как превышать значение d_{k_1} , так и быть меньше d_{k_1} (гексоген). В табл. 1 приведены значения d_{k_1} , d_{k_2} , d_* , D_{k_1} , D_* для разных ВВ в зависимости от их дисперсности. Для тетрила и тэна в интервале диаметров заряда $d_{k_1} - d_{k_2}$ при мощном инициировании нормальная детонация затухает, и на больших длинах заряда устанавливается стационарный низкоскоростной режим, наблюдаемый при слабом инициировании. Таким образом, в этих ВВ устойчивая низкоскоростная детонация

Таблица 1

ВВ	ρ_0 , г/см ³	l_0 , мм	d_{k_1} , мм	d_{k_2} , мм	d_* , мм	D_{k_1} , км/сек	D_* , км/сек
Тротил	0,95	0,5	23	25	31	1,1	1,9
Тетрил	0,9	0,5	7	13	13	1,4	2,1
		0,8	9	15	16	1,3	2,3
		1,3	12	20	21	1,3	2,2
Тэн	1,0	1,3	7	9	9	1,5	2,0
		2,0	10	12	12	1,6	2,0
		4,2	13	14	16	1,5	2,1
Гексоген	1,0	1,3	15	12	17	1,6	2,0
		2,0	18	15	23	1,6	2,1
		4,2	23	22	29	1,5	2,0

может быть получена и при слабом, и при мощном инициировании. Характерными особенностями зависимости скорости детонации от диаметра заряда в рассмотренном случае являются ее разрывность при определенном значении скорости распространения и отсутствие стационарных режимов детонации со скоростями $\sim 2,2\text{--}4,2$ км/сек.

При изучении зависимости скорости детонации от диаметра заряда для модельных промышленных ВВ на основе NH_4NO_3 с небольшим (20—50%) содержанием вторичного сенсibiliзирующего ВВ (НГЦ, тетрил, тротил) было показано, что при определенной дисперсности ВВ в некотором интервале диаметров заряда эти смеси устойчиво детонируют со скоростями, меньшими 2,0 км/сек, при широком варьировании мощности инициирующего импульса [7, 8]. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда аналогична описанной для индивидуальных ВВ с той лишь разницей, что переход к нормальным детонационным режимам при $D > D_*$ осуществляется в конечной области диаметров заряда (рис. 1). Однако и в этом случае величина D_* равна таковой для чувствительной компоненты смеси и не зависит от свойств других компонентов. Отметим, что увеличение процентного содержания чувствительной компоненты (до 80%) в смеси трансформирует профиль $D(d)$, приближая его к наблюдаемому в индивидуальных ВВ.

Указанные особенности зависимости скорости детонации от диаметра заряда для порошкообразных вторичных ВВ и модельных промышленных ВВ тесно связаны с механизмом химического превращения ВВ в детонационной волне и могут быть использованы для его выяснения.

Методом «аквариума» [9, 10] были измерены давления в детонационных волнах порошкообразных ВВ. Схема эксперимента и образец фоторазвертки распространения детонации и ударной волны в плексигласовом блоке, граничащем с зарядом ВВ, представлены на рис. 2, а, б (в качестве внешнего светового источника использовалось свечение продуктов взрыва вспомогательного заряда смеси гексогена с алюминием насыпной плотности). Результаты измерения давлений в детонационных волнах приведены в табл. 2. Отметим, что полученные значения давлений детонации хорошо согласуются с результатами измерений профилей массовой скорости продуктов взрыва в тех же ВВ электромагнитным методом [11]. Из данных табл. 2 следует, что давления при низкоскоростных детонационных режимах составляют $\sim 10\text{--}15$ кбар и значительно ниже давлений, достигаемых при нормальной детонации в тех же диаметрах заряда.

Были оценены температуры ударного сжатия при давлении 15 кбар. Ударный разогрев определялся как

$$\Delta T = \frac{\Delta E_{\tau}}{\bar{C}_v}$$

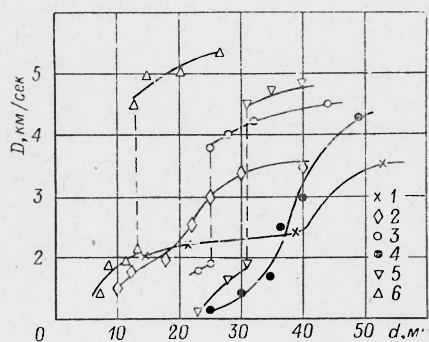


Рис. 1. Зависимости скорости детонации от диаметра заряда для некоторых индивидуальных и модельных промышленных ВВ.

1 — НГЦ/ NH_4NO_3 ($l_0=0,24$ мм), 20/80, $\rho_0 = 1,0$ г/см³; 2 — тетрил ($l_0=0,12$ мм)/NaCl ($l_0=0,8$ мм), 50/50, $\rho_0 = 1,0$ г/см³; 3 — тротил ($l_0=0,32$ мм)/ NH_4NO_3 ($l_0=0,5$ мм), 80/20, $\rho_0 = 0,9$ г/см³; 4 — тротил ($l_0=0,32$ мм)/ NH_4NO_3 ($l_0=0,5$ мм), 50/50, $\rho_0 = 0,9$ г/см³; 5 — тротил ($l_0=0,5$ мм); $\rho_0 = 0,95$ г/см³; 6 — тетрил ($l_0=0,5$ мм), $\rho_0 = 0,9$ г/см³.

где ΔE_{τ} — изменение тепловой энергии при ударном сжатии; \bar{C}_v — средняя теплоемкость ВВ.

$$\Delta E_{\tau} = 0,5 p (v_0 - v) - \int_v^{v_0} p_1 dv.$$

Здесь p — давление в ударной волне; v_0 — начальный удельный объем ВВ; v — удельный объем ВВ в ударной волне; p_1 — давление при изотермическом сжатии.

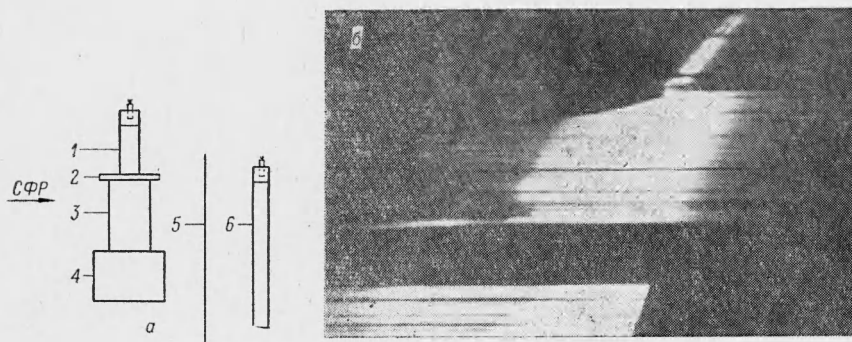


Рис. 2. Определение скорости ударной волны в плексигласовом блоке.
a — схема эксперимента: 1 — активный заряд, 2 — инертная преграда, 3 — заряд исследуемого ВВ, 4 — плексигласовый блок, 5 — рассеивающий экран, 6 — вспомогательный заряд ВВ; *б* — фоторазвертка процесса распространения волновых фронтов.

Изотермы тротила, гексогена и тэна были определены в работе [12]. При полученных разогревах ($\Delta T \sim 10^\circ$) разложение гомогенных зерен ВВ в объеме за времена их пребывания в детонационной волне исключено. Следовательно, превращение ВВ в этих условиях происходит в форме поверхностного горения отдельных частиц. Этот вывод относится и к нормальной детонации порошкообразных ВВ ($p \sim 50$ кбар).

Таблица 2

ВВ	l_0 , мм	d , мм	ρ_0 , г/см ³	D , км/сек	p , кбар
Гексоген	2,0	20	0,97	1,98	10,4
Тетрил	1,3	20	0,91 0,92	2,14 4,26	14,5 50,0
Тротил	0,5	30	0,93 0,92	2,12 4,18	14,8 46,8

Расчет температур ударного сжатия, проведенный в работе [13], дает для $p=50$ кбар значение $\Delta T \sim 100^\circ$, что также недостаточно для объемного разложения за время ~ 1 мксек.

В связи с высказанными соображениями о протекании химического превращения рассмотрено влияние состояния поверхности частиц ВВ на пределы стационарного распространения детонации. Покрытие зерен ВВ тонким слоем масла ($\sim 5 \mu$), вводимого в заряды тетрила и тротила в количестве 2% от общего веса, увеличивает критический диаметр

низкоскоростных режимов детонации d_{k_1} при слабом инициировании настолько, что их не удается наблюдать в диаметрах заряда, меньших 40 мм. При мощном инициировании низкоскоростные режимы также не наблюдались, а величина критического диаметра нормальной детонации d_{k_2} возросла примерно на 15%.

Таким образом, можно считать достаточно обоснованным утверждение о том, что в детонационной волне низкоскоростного режима химическая реакция идет в виде поверхностного горения [14, 15]. Для подтверждения правомерности указанной модели сравним следующую из нее зависимость характерных диаметров зарядов (d_{k_1} , d_{*}) от дисперсности ВВ с наблюдаемой в эксперименте. Оценим долю тепла, выделяющегося в детонационной волне, в следующих упрощающих предположениях: 1) горение частиц ВВ является послойным, 2) линейная скорость горения в области, не охваченной волной разрежения, постоянна. В этих предположениях долю сгоревшего в детонационной волне вещества η можно представить в виде:

$$\eta = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} 2 \pi r \left[4 \pi \int_0^{\frac{r_0-r}{c}} (R_0 - ut)^2 u dt \right] dr =$$

$$= \left(\frac{r_0 u}{R_0 c} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{r_0 u}{R_0 c} \right)^2 + \frac{1}{10} \left(\frac{r_0 u}{R_0 c} \right)^3,$$

где r_0 — радиус заряда; u — линейная скорость горения; R_0 — начальный радиус частиц ВВ; c — средняя скорость волны разрежения.

Доля тепла, выделенного в детонационной волне, является функцией безразмерного параметра $b = \frac{r_0 u}{R_0 c}$. Равным скоростям детонации (в том числе в предельных условиях распространения и при переходе на нормальный детонационный режим, т. е. значениям D_{k_1} и D_{*}) отвечают равные значения η , т. е. одинаковые значения b . Следовательно, соответствующие величины диаметров заряда d_{k_1} и d_{*} должны быть пропорциональны начальным размерам частиц ВВ (рис. 3).

Рассмотренная модель «взрывного» горения удовлетворительно объясняет экспериментальные факты, касающиеся низкоскоростной детонации порошкообразных ВВ. Однако в рамках принятых упрощений (дисперсность ВВ изменяется лишь за счет выгорания в зоне химического превращения) зависимость скорости детонации от диаметра заряда должна быть плавной.

Непротиворечивое объяснение отмеченным выше своеобразным зависимостям скорости детонации от диаметра заряда, в частности, дискретности детонационных режимов, может быть дано на основе гипотезы о том, что по достижении определенных давлений в детонационных волнах порошкообразных ВВ происходит разрушение отдельных зерен¹. Дробление может иметь место в волнах разрежения при выходе ударной волны на свободную поверхность зерна или же при

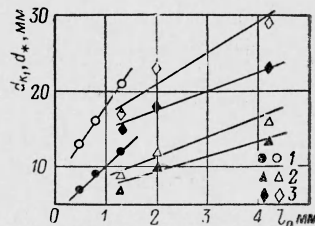


Рис. 3. Зависимости критического d_{k_1} (черные точки) и предельного d_{*} (светлые точки) диаметров низкоскоростной детонации от размера частиц ВВ. 1 — тетрил; 2 — тэн; 3 — гексен.

¹ На такую возможность нам было указано А. Д. Марголинным.

торможении ускоренного ударной волной вещества о находящуюся впереди частицу. Резкое увеличение дисперсности ВВ, а значит, и удельной поверхности горения, приведет к стремительному возрастанию энергии, идущей на поддержание распространения детонационной волны. В случае индивидуальных ВВ следствием этого является установление нормальной детонации, отвечающей большей полноте превращения. В смесях с малым процентным содержанием чувствительной компоненты увеличение скорости детонации несколько растянуто по диаметрам заряда из-за пониженной теплоты взрывчатого превращения. С точки зрения гипотезы о дроблении частиц кажутся вполне естественными отклонения зависимости критический диаметр нормальной детонации — размер частиц ВВ от линейной (существенное ослабление ее) с уменьшением дисперсности [16, 17], факты сильного влияния бронировки зерен ВВ на возможность устойчивого распространения низкоскоростной детонации и, наоборот, слабого влияния ее при нормальной детонации. Единственный недостаток предположения о диспергировании ВВ по достижении

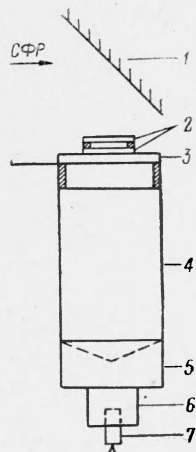


Рис. 4. Схема эксперимента по инициированию взрыва ударом летящего слоя ВВ.
1 — зеркало; 2 — слой ВВ; 3 — экран; 4 — активный заряд; 5 — взрывная линза; 6 — промежуточный детонатор; 7 — электродетонатор.

некоторого давления состоит в невозможности его экспериментальной проверки, связанной с отсутствием соответствующих прочностных характеристик ВВ в условиях ударного нагружения.

Результаты опытов, схема которых изображена на рис. 4, показывают, что действительно по достижении некоторого давления в детонационной волне порошкообразного ВВ ($\rho_{кр}$) заметно изменяется интенсивность сгорания зерен ВВ. Это может быть вызвано, в частности, сильным увеличением удельной поверхности горения в результате дробления частиц ВВ. Гранулированное ВВ в этих экспериментах моделировалось двумя слоями однородного ВВ толщиной ~ 2 мм и диаметром 20 мм, разделенных зазором ~ 2 мм. Расширяющиеся в воздушном промежутке продукты взрыва активного заряда (ТНТ/NaCl 70/30, $d=40$ мм, $\rho_0=1,40$ г/см³) создавали в медном экране ударную волну, которая переходила в слой исследуемого ВВ.

Интенсивность ударной волны, распространяющейся

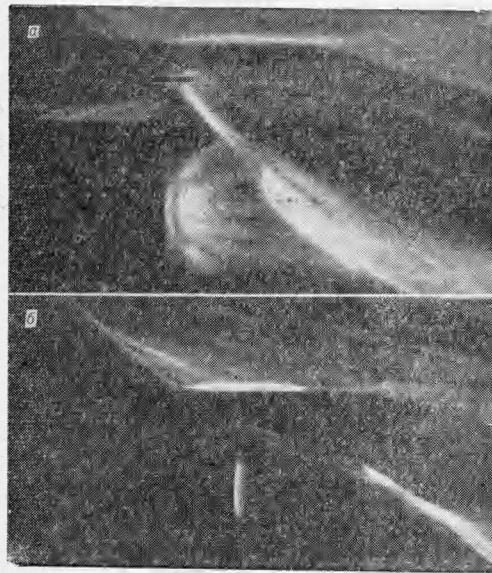


Рис. 5. Типичные фоторазвертки при постановке опыта по схеме рис. 4.
а — взрыв слоев при ударе ($p > p_{кр}$); б — взрыв отсутствует ($p < p_{кр}$).

по ВВ, недостаточна для инициирования разложения слоя за времена проведения эксперимента. При выходе ударной волны на свободную поверхность ВВ начинало двигаться и через определенное время налетало на второй слой ВВ или же пластину из плексигласа (при исследовании НГЦ). Образцы ВВ были прозрачны, что позволяло проводить наблюдение за развитием процесса соударения с торца сборки посредством СФР. В зависимости от интенсивности ударной волны, вошедшей в первый слой, наблюдается либо свечение, соответствующее взрыву слоев при ударе, либо непродолжительное высвечивание воздуха в зазоре (рис. 5, а, б).

Изменение амплитуды ударной волны осуществлялось изменением расстояния между активным зарядом и экраном. Предельные давления в ударных волнах $p_{кр}$, вызывающие при соударении слоев взрыв, приведены ниже:

ВВ	$p_{кр}$, кбар
Тэн	24,5
Гексоген	34,0
НГЦ	20,0

Ошибка измерения $p_{кр}$ составляет $\sim 10\%$. Оказалось, что $p_{кр}$ несколько выше давлений, развиваемых при низкоскоростных детонационных режимах, но ниже тех, которые имеют место при нормальной детонации. Описанная схема опытов по инициированию взрыва ВВ при торможении летящего слоя является, конечно, весьма грубой моделью процессов, имеющих место при прохождении ударной волны по заряду порошкообразного ВВ. Беспорядочная ориентация частиц и возможность образования микрокумулятивных струй облегчает возбуждение эффективной взрывной реакции по рассмотренному выше механизму, что приведет к вступлению его в действие при давлениях, меньших приведенных и более близких к тем, при которых происходит срыв низкоскоростных детонаций в нормальные.

Поступила в редакцию
18/V 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Taylor. Detonation in condensed explosives. Oxford at the Clarendon Press, 1952.
2. M. A. Cook. The science of high explosives. N. Y., 1958.
3. Г. С. Соснова, И. М. Воскобойников, А. В. Дубовик. Докл. АН СССР, 1963, 149, 3.
4. И. М. Воскобойников, А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Докл. АН СССР, 1965, 161, 5.
5. А. В. Дубовик, И. М. Воскобойников, В. К. Боболев. ФГВ, 1966, 4.
6. А. К. Парфенов, А. Я. Апин. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 1.
7. И. М. Воскобойников, А. Н. Афанасенков. Сб. «Взрывное дело», № 55/12. «Недра», 1964.
8. А. К. Парфенов, И. М. Воскобойников, А. Я. Апин. Сб. «Взрывное дело», № 60/17, «Недра», 1966.
9. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва, Физматгиз, 1959.
10. M. A. Cook, D. Rask, W. McEvan. Trans. Far. Soc., 1960, 56, 7.
11. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
12. М. Я. Васильев, Б. Б. Балашов, Л. Н. Мокроусов. ЖФХ, 1960, XXXIV, 11.
13. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов, А. Н. Афанасенков. ФГВ, 1967, 3, 4.

14. А. Я. Апин. Докл. АН СССР, 1939, 24, 922.
15. А. Я. Апин. Докл. АН СССР, 1945, 50, 285.
16. А. Я. Апин, Л. Н. Стесик. Сб. «Физика взрыва», № 3, Изд-во АН СССР, 1955.
17. А. Я. Апин, Н. Ф. Велина. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.

УДК 534.222.22*

ИНИЦИИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЖИДКИЕ ВВ СЛАБЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

А. В. Дубовик, В. К. Боболев

(Москва)

В настоящее время вопрос об инициировании детонации в однородных ВВ, жидких и монокристаллических, с помощью сравнительно мощных (60–120 кбар) ударных волн достаточно подробно исследован экспериментально и теоретически. Установлено, что возбуждение быстрой реакции в ударно сжатом и нагретом веществе, имеющем место через время периода индукции, определяется возникновением теплового взрыва на границе раздела жидкости и инертного барьера, отделяющего заряд ВВ от генератора ударной волны (обычно — заряд мощного ВВ).

Менее подробно исследован значительно более важный для практики обращения с ВВ вопрос об условиях возбуждения взрыва в жидкостях под воздействием сравнительно слабых ударных волн (~1–10 кбар). Поскольку ударный разогрев ВВ в этом случае весьма невелик (не выше 100°), было предположено [1], что возбуждение быстрой реакции может происходить в локальных высокотемпературных участках («горячих точках»), являющихся местами концентрации энергии при прохождении ударной волны. В случае жидких ВВ такими участками могут быть различные посторонние включения — пузырьки газа, частицы примесей и т. д. Действительно, чувствительность жидкостей заметно возрастает, если в них содержатся указанные включения. Следует заметить, что характер включений (размер, в частности) влияет, в свою очередь, на картину инициирования [2–4].

Однако на практике используются сравнительно очищенные однородные жидкие ВВ, опасность обращения с которыми тем не менее общеизвестна. Правда, в относительно вязких жидкостях типа нитроглицерина (НГЦ) постоянно может содержаться некоторое небольшое количество воздушных пузырьков, но, как правило, их размеры сравнительно невелики, в силу чего их присутствие не оказывает влияния на такую характеристику чувствительности ВВ, как величину порога инициирования [5].

С другой стороны, большое количество пузырьков может быть введено в жидкое ВВ во время самого процесса инициирования, при этом важную, если не решающую, роль в инициировании начинают играть такие факторы, как характер воздействующей нагрузки на жидкость, а также наличие оболочки заряда ВВ [6, 7]. Известно, что жидкости плохо сопротивляются воздействию отрицательных напряжений, вследствие чего при сжатии и последующей разгрузке в них возникают нарушения сплошности (кавитация). Кавитационные пузырьки в жидкости через некоторое время в зависимости от характера воздействия