

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. К. Парфенов, А. Я. Апин. НТПГВ, 1965, 1, 1.
2. А. К. Парфенов, И. М. Воскобойников, А. Я. Апин. В сб. «Взрывное дело», № 66/17. М., «Недра», 1966.
3. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. В сб. «Взрывное дело», № 63/20. М., «Недра», 1967.
4. А. К. Парфенов, И. М. Воскобойников. ФГВ, 1969, 5, 3.
5. В. И. Ващенко, Ю. Н. Матюшин и др. ФГВ, 1971, 7, 2.
6. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. Методы исследования процессов горения и детонации. М., «Наука», 1969.
7. А. Н. Дремин, К. К. Шведов. О детонации промышленных ВВ вблизи критического диаметра. Тр. науч.-техн. совещания по отказам детонации скважинных зарядов ВВ. Кривой Рог, июнь, 1970.
8. И. В. Бабайцев, Б. Н. Кондриков, В. Ф. Тышевич. ФГВ, 1967, 3, 4.
9. И. В. Бабайцев, Б. Н. Кондриков и др. ФГВ, 1969, 3, 5.
10. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ФГВ, 1971, 7, 1.
11. А. И. Коротков, А. А. Сулимов и др. ФГВ, 1969, 5, 4.
12. А. Н. Дремин, К. К. Шведов, О. С. Авдонин. ФГВ, 1970, 7, 4.

УДК 662.4

### О ВЛИЯНИИ ОБОЛОЧКИ ЗАРЯДА НА СТАБИЛЬНОСТЬ МАЛОЙ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ В ПОРОШКООБРАЗНОМ ТРОТИЛЕ

*А. В. Дубовик, А. А. Денисаев, В. К. Боболев*

*(Москва)*

Для предельных условий распространения детонации в зарядах порошкообразных твердых взрывчатых веществ характерно наличие двух детонационных режимов, скорости которых по величине отличаются в 3—4 раза. При детонации с пониженной скоростью (малая скорость детонации, МСД) лишь небольшая часть исходного вещества реагирует во фронте волны [1, 2]. Из анализа результатов измерений кинематических параметров МСД в зарядах порошкообразных ВВ следовал вывод о существовании локальных очагов инициирования реакции во фронте волны [3, 4], которая в дальнейшем протекает в соответствии с моделью взрывного горения Апина — Эйринга.

Несмотря на определенные успехи в исследовании механизма МСД, феноменологическая картина распространения этого режима детонации выяснена недостаточно. Такой вывод следует из приведенных ниже результатов фотографического исследования свечения фронта МСД как при стабильном, так и при неустойчивом распространении в зарядах порошкообразного тротила с оболочками из плексигласа различной толщины. Оказалось, что наличие оболочки не эквивалентно увеличению диаметра заряда при переходе от МСД к нормальной детонации.

Эксперименты проводились с зарядами ТНТ плотностью  $1,0 \text{ г/см}^3$  и размером частиц  $0,4 \div 0,63 \text{ мм}$ . Диаметр зарядов варьировался от 21,5 до 30 мм, длина достигала 50 см, толщина плексигласовых оболочек  $\delta = 2,5 \div 45 \text{ мм}$ . Оболочки тщательно полировались. МСД инициировалась ударной волной с амплитудой около 7 кбар, создаваемой взрывом промежуточного заряда содата 50/50 диаметром 30 мм.

### Картина свечения МСД

На рис. 1 представлены боковые фоторазвертки стабильного (а) и нестационарного (б) распространения МСД в зарядах диаметром 21,5 и 25 мм соответственно (длина зарядов 25 см, толщина оболочек 5 мм). Стационарная МСД распространяется со скоростью 1300 м/с. В заряде диаметром 25 мм наблюдается переход от МСД ( $D=1500$  м/с) к нормальной детонации ( $D=4500$  м/с). В обоих случаях с боку зарядов отчетливо наблюдаются два фронта свечения, причем в случае стабильной МСД траектории указанных фронтов свечения приблизительно параллельны (интервал времени между фронтами  $\approx 5$  мкс), тогда как при нестационарном процессе — нет. Для идентификации свечений проводился ряд экспериментов, описание которых дается ниже.

При перепуске МСД из заряда диаметром 25 мм с тонкостенной оболочкой ( $\delta=2,5$  мм) в заряд с толстостенной оболочкой ( $\delta=25$  мм) первое свечение пропадает на границе раздела зарядов, а второе распространяется без изменений. Когда толстостенная оболочка заменялась целлофановой, вновь повторялась картина обрыва первого свечения. Предварительно можно сделать вывод, что фронту МСД отвечает второе свечение на боковой поверхности заряда.

Исследование профиля массовой скорости с помощью электромагнитного метода не дало новых результатов по сравнению с известными ранее [3]: датчик скорости регистрирует лишь одно волновое возмущение с амплитудой 7,5 кбар. В редких случаях перед фронтом волны фиксируется быстро осциллирующее возмущение с небольшой (менее 1 кбар) амплитудой. Разрешающая способность метода «аквариума» также оказалась недостаточной для точного измерения давления в первом возмущении (по оценкам, его амплитуда меньше 1 кбар).

Несколько дополнительных экспериментов потребовалось для подтверждения сделанного вывода о свечении фронта МСД. В одном из них МСД перепускалась из ТНТ в заряд тэна насыпной плотности (диаметр 25 мм, толщина оболочки 2,5 мм). На рис. 2 наблюдается детонация тэна при переходе второго свечения (фронта МСД) через границу раздела зарядов. Переход первого свечения не сопровождается появлением каких-либо эффектов. При замене тэна инертным порошком первое свечение продолжается в течение короткого ( $\sim 10$  мкс) времени за границей раздела и затем исчезает, второе свечение резко обрывается на границе с инертным веществом.

В опытах с зарядами в оболочках различной толщины было обнаружено, что первое свечение пропадает при  $\delta > 25$  мм. Аналогичное явление наблюдается при распространении МСД в зарядах с целлофановыми оболочками.

Для выяснения природы первого свечения производилась фоторегистрация свечения фронта МСД в момент выхода на торец заряда. В опытах с толстостенными и тонкостенными оболочками регистрирует-

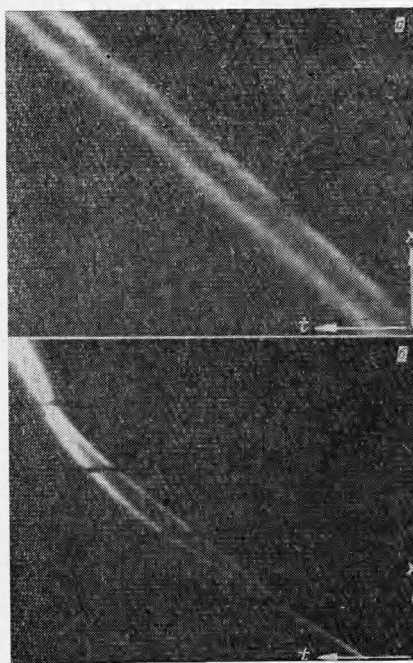


Рис. 1. Боковые фоторазвертки распространения МСД, расстояние между горизонтальными метками 50 мм.

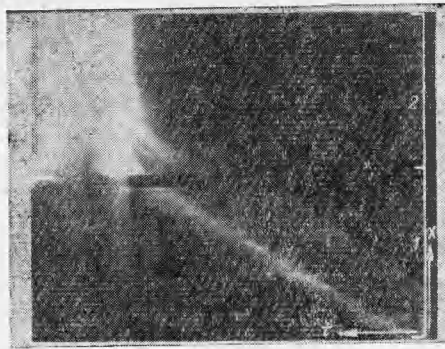


Рис. 2. Перепуск MSD из заряда ТНТ (1) в заряд свинца (2). А — граница раздела зарядов.

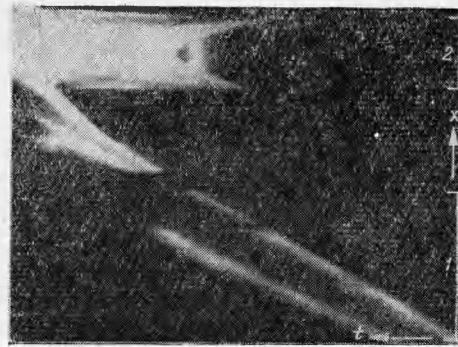


Рис. 3. Одновременная фоторегистрация распространения (1) и выхода на торец заряда (2) MSD при  $\delta = 2,5$  мм.

ся только свечение фронта MSD, а в опытах с оболочками промежуточной толщины ( $\delta = 2,5 \div 20$  мм) до момента выхода фронта MSD с торца регистрируется кольцевое свечение в периферийной области заряда (рис. 3, одновременная фоторегистрация с торца и с боку заряда).

В контрольных опытах, когда торец заряда прикрывался плексигласовой пластиной, характер свечения не изменялся, что исключало его идентификацию со свечением воздушной ударной волны. Наиболее вероятно рассматривать его появление как связанное со свечением газообразных продуктов взрыва (ПВ) MSD в зазоре между веществом и оболочкой заряда.

Действительно, поскольку скорость звука в материале оболочки ( $c_0 = 2750$  м/с) больше величины скорости детонации (1500 м/с), то непосредственное («силовое») воздействие со стороны фронта способно вызвать радиальное расширение оболочки, придавая последней форму усеченного конуса перед фронтом MSD. Очевидно, с удалением от фронта детонации величина указанного воздействия ослабляется в связи с затуханием ударных волн в оболочке и уменьшением амплитуды радиальных колебаний.

Поскольку жесткость оболочки при данной величине силового воздействия зависит от ее толщины, то отсутствие первого свечения в опытах с толстыми оболочками может прямо следовать из этого факта. Для объяснения результата опытов с целлофановыми оболочками необходимо принять во внимание влияние боковой разгрузки в детонирующем заряде.

На рис. 4 приведена фотография фронта MSD в заряде диаметром 25 мм с оболочкой  $\delta = 2,5$  мм, полученная методом компенсации движения объекта [5] на фоне яркого экрана.

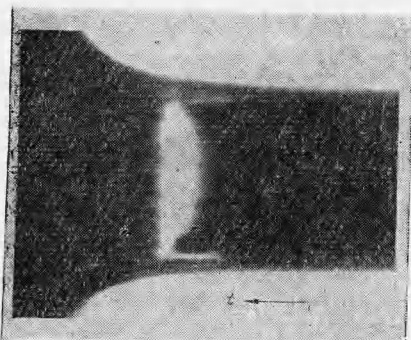


Рис. 4. Фотография фронта MSD в порошкообразном ТНТ.

В указанном эксперименте участок оболочки (длиной 50 мм) вблизи торца разрезался вдоль оси заряда; одна из половинок заменялась плексигласовой пластиной, через которую производилось фотографирование фронта MSD. На рис. 4 видны струи ПВ вблизи стенок оболочки и расширение последней впереди фронта MSD. Угол  $\beta$  между образующей конуса и осью заряда, по данным нескольких опытов, составляет  $2-4^\circ$ . Установить характер зависимости  $\beta$  от  $\delta$  не удается

ввиду недостаточной разрешающей способности указанного метода измерения.

На рис. 5 приведена серия последовательных фотографий детонирующего заряда  $\varnothing 25$  мм ( $\delta=2,5$  мм). Для регистрации выхода МСД на торец заряда сверху располагалось зеркало под углом  $45^\circ$  к его оси. Хорошо видны фронт МСД и предшествующее свечение ПВ.

В зависимости от конфигурации заряда картина свечения и скорость распространения струй ПВ изменяются. На рис. 6 приведена фотограмма детонации заряда  $\varnothing 25$  мм с оболочкой толщиной 30 мм, внутрь которой помещалась цилиндрическая медная втулка диаметром 24 мм с толщиной стенок 0,01 мм и длиной 20 мм. В обычных условиях (без втулки) в зарядах с указанной оболочкой наблюдается лишь свечение фронта МСД.

На приводимой фотографии хорошо заметно возникновение высокоскоростного ( $u=3200$  м/с) потока ПВ в зазоре между оболочкой и втулкой при выходе МСД на исследуемый участок заряда (заметим, что величина малой скорости детонации составляла 1500 м/с).

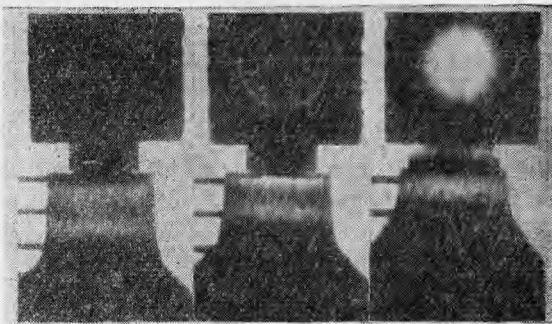


Рис. 5. Покадровая съемка (350 тыс. кадр/с) детонирующего заряда ТНТ. Слева от заряда — рейка с метками через 10 мм.

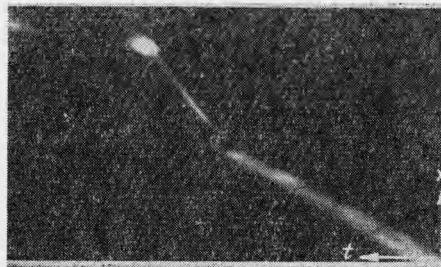


Рис. 6. Фоторазвертка опыта с медной втулкой 1.

### Распространение нестационарной МСД

В результате экспериментов установлено, что в зарядах диаметром 21,5 мм с оболочками  $\delta=2,5-45$  мм МСД распространяется устойчиво (длина до 60 см).

В достаточно длинных ( $\sim 50$  см) зарядах диаметром 25 мм МСД распространяется, как правило, нестационарно, причем стабильность процесса существенным образом зависит от толщины оболочки заряда.

На рис. 7 приведены кривые изменения величины скорости переходного режима для зарядов с плексигласовыми оболочками толщиной 2,5 (1) и 10 (2), 45 мм (3) и с оболочкой из целлофана (4). Каждая точка получена усреднением результатов пяти опытов. Из анализа рис. 7 следует, что применение толстостенных оболочек в меньшей степени способствует переходу от МСД к нормальной детонации, чем в случае применения оболочек промежуточной толщины. В целлофановых оболочках наблюдается затухание детонации на длине около четырех диаметров. В этой связи интересно отметить, что найденные условия нестационарности полностью совпадают с обсуждавшимися выше условиями возникновения двухфронтной картины свечения МСД. Полученный результат позволяет сделать вывод о том, что характер устойчивости МСД определяется способностью ПВ опережать фронт МСД, которая, как видно, зависит от конфигурации заряда. Ряд опытов подтверждает сделанный вывод:

а) переходный процесс сильно затягивался при перепуске МСД из заряда с оболочкой  $\delta=2,5$  мм в заряд с оболочкой  $\delta=25$  мм;

б) в опытах с зарядами в оболочках  $\delta=2,5$  мм, на внутренней поверхности которых с интервалом 50 мм имелись кольцевые выступы шириной 2,5 мм и толщиной 1 мм, наблюдалось стационарное распространение МСД на длине заряда 60 см. Напомним, что в аналогичных опытах без кольцевых выступов переход к нормальной детонации завершился на участке заряда длиной 20 см. На фотограммах отчетливо видно периодическое прерывание и повторное формирование струй ПВ в месте расположения кольцевых выступов.

В настоящее время конкретный механизм влияния струй ПВ на устойчивость МСД недостаточно ясен. Из ряда предположений, существующих на этот счет, представляется

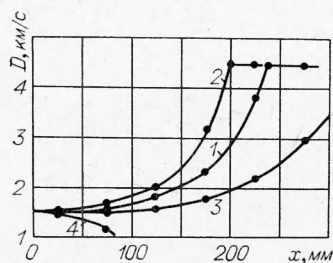


Рис. 7. Скорость переходного режима в зависимости от расстояния, пройденного волной.

возможным диспергирование зерен ТНТ в зоне проникания струй ПВ впереди фронта МСД. Показательны в этом отношении результаты опытов с зарядами в целлофановых оболочках. Подмешивание к исходному продукту небольшого (менее 5% по весу) количества мелкой фракции (размер частиц  $<0,1$  мм) резко повышало устойчивость МСД, которая стационарно распространялась в зарядах длиной 50 см.

Результаты настоящего исследования дают новую информацию о природе МСД порошкообразных ВВ. Обнаруженный характер движения волновых возмущений впереди фронта МСД и роль оболочки в этом процессе обладают рядом закономерностей, которые являются общими с подобными явлениями при МСД в жидких ВВ [6].

Этот результат согласуется с ранее сделанным выводом [6] об известной аналогии механизма распространения МСД в твердых порошкообразных ВВ и жидких в состоянии кавитации. Однако указанную аналогию не следует распространять на переходные режимы детонации, поскольку нормальная детонация порошков имеет специфические особенности, отличающие ее от явления нормальной детонации в жидких ВВ.

Поступила в редакцию  
13/XII 1972

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. Taylor. Detonation in condensen explosives. Oxford University Press, 1952.
2. В. И. Ващенко, Ю. Н. Матюшин и др. ФГВ, 1971, 7, 1.
3. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. «Взрывное дело», 63/20. М., «Недра», 1967.
4. А. К. Парфенов, И. М. Воскобойников. ФГВ, 1969, 5, 3.
5. К. И. Щелкин. Быстрое горение и спиновая детонация газов. М., Воениздат, 1940.
6. А. В. Дубовик. Канд. дисс. ИХФ АН СССР. М., 1966.