

Таким образом, можно сделать следующий вывод.

Измеренные времена задержки развития взрыва по увеличению электропроводности заметно отличаются от определенных оптическим методом. Поэтому необходимо независимым способом определить, какому проценту превращения соответствует та или иная величина проводимости. Только после этого возможно сделать выбор между методами электропроводности и оптическим методом с целью использования задержек инициирования взрыва для изучения кинетики разложения ВВ. Для установления же нижних пределов давления ударной волны, при которых вещество не претерпевает заметного разложения, наиболее приемлемым представляется метод измерения диэлектрической проницаемости.

Поступила в редакцию
6/II 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Бриш, М. С. Тарасов, В. А. Цукерман. ЖЭТФ, 1959, 37, 6 (12), 1543—1549.
2. А. Г. Иванов, Ю. Н. Тюняев и др. ФГВ, 1969, 5, 3.
3. С. А. Колдунов, А. Н. Дремин. В сб. «Взрывное дело», № 63/20. М., «Недра», 1967.
4. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ФГВ, 1972, 8, 1.
5. A. W. Campbell, W. G. Davis, I. R. Travis. The Physics of fluid, 1963, 4, 4.
6. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, А. Н. Андриевский. НТПГВ, 1965, 1, 2.
7. Л. В. Кулешова. ФТТ, 1969, 11, 5.
8. А. Н. Дремин, К. К. Шведов, В. А. Веретенников. Сб. «Взрывное дело», № 52/9. М., Гостехиздат, 1963.
9. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Изд-во АН СССР, 1947.
10. В. И. Минкин, О. А. Осипов, Ю. А. Жданов. Дипольные моменты в органической химии. М., «Химия», 1968.
11. Michael, C. Thwaite, R. Show. J. Chem. Phys., 1970, 53, 2.

УДК 662.215.1

О СТАЦИОНАРНОСТИ «ДЕТОНАЦИИ С МАЛОЙ СКОРОСТЬЮ» В ТВЕРДЫХ ПОРОШКООБРАЗНЫХ ВВ

К. К. Шведов, С. А. Колдунов, А. Н. Дремин

(Москва)

В ряде работ по исследованию детонации с малой скоростью в зарядах твердых ВВ без оболочки или в слабой оболочке, выполненных в последнее время, большое внимание уделяется механизму разложения вещества. При этом распространение взрыва с малой скоростью рассматривается как детонация в неидеальном режиме с использованием для постановки задачи и для анализа результатов основных выводов современной гидродинамической теории детонации [1—5].

Однако режимы распространения взрыва с малой скоростью ($\approx 1—2$ км/с) в твердых ВВ наблюдаются очень редко и только в специфических условиях проведения эксперимента. Обычно они либо затухают, либо развиваются до нормальной детонации. Поэтому всегда возникают сомнения относительно стационарности распространения такого режима и правомерности использования закономерностей гидродинами-

ческой теории детонации для его объяснения (условие Чепмена — Жуге, оценка энергии взрыва).

Данная работа посвящена изучению стационарности «детонации с малой скоростью» в зарядах порошкообразного тротила. Для исследования был выбран тротил с размером частиц $\approx 0,5\text{--}1,0$ мм, полученный путем помола и отсева из промышленного «чешуированного» ТНТ. Заряды готовились засыпкой ВВ в тонкие (≈ 1 мм) бумажные оболочки. Средняя плотность ВВ составляла около $1,0$ г/см³. При выбранном размере зерна и плотности ВВ возможность распространения низкоскоростного режима может зависеть от диаметра заряда и мощности инициатора, поэтому последние варьировались в широких пределах, чтобы создать оптимальные условия. Диаметр заряда d менялся от 24 до 40 мм через каждые 2 мм. Применялись три типа инициаторов. Первый инициатор (№ 1) был близок по параметрам к ожидавшейся «детонации с малой скоростью» (скорость фронта $D=2,0$ км/с), состоял из заряда содата (смесь ТНТ/NaCl 45/55, $\rho_0=0,9$ г/см³) длиной $3d$, прессованной таблетки из смеси ТНТ/Г 50/90 весом 10 г и ЭД № 8. Инициатор № 3 по параметрам детонации был близок к нормальной детонации тротила ($D=4,5\text{--}5$ км/с), но в отличие от инициатора № 1 не имел заряда содата. Инициатор № 2 имел промежуточные значения параметров детонации ($D=3,0$ км/с). Он готовился так же, как инициатор № 1, но длина заряда содата составляла $1d$. Исследуемый заряд всегда находился в контакте с зарядом-инициатором. Регистрация характеристик возникающего процесса производилась различными методами.

В предварительных качественных экспериментах о возможности и продолжительности распространения взрыва с малой скоростью судили по отпечаткам на стальных или деревянных пластинах-свидетелях и остаткам заряда ВВ. Для детального исследования стационарности производилась фотографическая регистрация фронта, а также определение скорости фронта и профиля массовой скорости $u(t)$ посредством электромагнитного метода [6] на зарядах различной длины.

В качественных экспериментах по фиксированию отпечатков на пластине-свидетеле и остаткам ВВ в зарядах диаметром от 24 до 34 мм было установлено, что независимо от мощности инициатора всегда наблюдалось полное затухание процесса на длинах заряда менее $20d$. Следовательно, стационарных режимов детонации в зарядах этих диаметров нет. В зарядах диаметром 36—40 мм в зависимости от мощности инициатора взрывные процессы распространялись на различные расстояния с разными скоростями. Измерение профиля массовой скорости показало, что в отличие от нормальной детонации в низкоскоростных процессах распространения взрыва химпик четко не регистрируется (рис. 1). При этом, как отмечалось в работах [3, 7], в зарядах без оболочки низкоскоростные процессы не имеют «предвестника», который, как правило, сопутствует «детонации с малой скоростью» в зарядах в оболочках [8, 9]. Двухволновая конфигурация профиля $u(t)$ может наблюдаться в зарядах без оболочки лишь на стадиях сильного затухания и расщепления ударной волны [7] и в этом случае совершенно не связана с «детонацией с малой скоростью». Так как профиль $u(t)$ в низкоскоростных процессах распространения взрыва не имел химпика, то для количественных оценок значение массовой скорости всегда определялось по максимальному отклонению записи $u(t)$ при том завале фронта (t), который получался в опыте. Давление (p) оценивалось по известному соотношению теории ударных волн $p=\rho_0uD$.

В таблице приведены количественные данные, характеризующие процессы распространения взрыва в зарядах тротила диаметром 36, 38 и 40 мм в зависимости от мощности инициатора и длины заряда l .

Как видно из таблицы, даже с инициатором № 1 режимы распространения взрыва с низкими скоростями наблюдаются лишь на ограни-

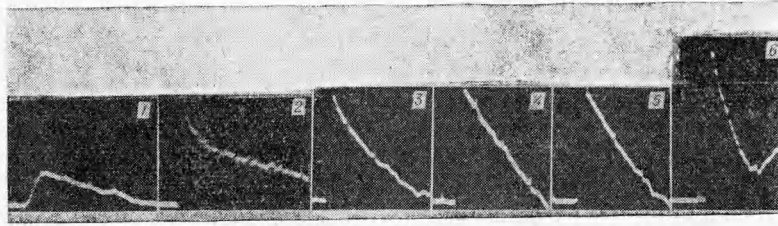


Рис. 1. Характерные профили массовой скорости при низкоскоростных режимах распространения взрыва.
 1 — $d=38$ мм; $l=10$ д; 3—6 — $d=40$ мм, $l=0$, $l=0,5$ д; $l=1$, $l=1,5$ д. Кадр 2 — нормальная детонация.

ченных длинах, зависящих от диаметра заряда. Так, для зарядов $d=40$ мм это расстояние не превышает $1d$, а в зарядах $d=36$ мм составляет около $7d$. Наиболее устойчиво низкоскоростной процесс распространялся в зарядах с $d=38$ мм. В опытах на пластине-свидетеле слабый след наблюдался на длинах заряда $l=30d$. Эксперименты по измерению D и u на зарядах длиной $(5\div 10)d$ хорошо воспроизводились и давали приблизительно совпадающие результаты. Поэтому создавалось впечатление установившегося режима. Лишь на длине заряда $15d$ удалось зарегистрировать заметное затухание. Скорость фронта снизилась с 1,14 до 0,75 км/с, массовая скорость упала в два раза и фронт волны размылся с 1,2 до 4,8 мкс.

Таким образом, в зарядах тротила $\rho_0=1,0$ г/см³ без оболочки низкоскоростные процессы стационарно не распространяются, и поэтому подобные режимы распространения реакции нельзя считать детонационными. Очевидно, это переходные процессы развития взрыва, аналогичные тем, которые наблюдаются при инициировании детонации ударной

Протяженность распространения взрывного процесса и его характеристики

| d , мм | Инициатор | l/d | D , км/с | u , км/с | P , кбар | t , мкс |
|----------|-----------|--|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| 36 | 1 | ≤ 7 ≤ 16 | 2,28 0,0 | — — | — — | — — |
| | 2 | $\leq 1,5$ $1,5\div 8$ $10\div 12$ | 3 1,8 0,0 | — — — | — — — | — — — |
| 38 | 1 | ≤ 4 | 1,8 | — | — | — |
| | | 5 | 1,25 | 0,55 | 6,9 | 1,16 |
| | | 10 | 1,14 | 0,41 | 4,7 | 1,28 |
| | | 15 | 0,75 | 0,2 | 1,5 | 4,8 |
| 40 | 1 | 0,25 | 2,45 | 0,9 | 22,0 | 0,45 |
| | | 0,5 | 2,82 | 1,0 | 2,82 | 0,45 |
| | | 1 | 2,80 | 0,95 | 26,6 | 0,5 |
| | | 1,5 | 3,16 | 1,0 | 31,6 | 0,5 |
| | | 2 | 4,37 | 1,50 | 65,6 | 0,45 |
| | | 10 | 4,57 | 1,70 | 77,7 | 0,75 |
| | | 20 | 4,4 | 1,68 | 74,5 | 0,8 |
| 40 | 3 | 1 | 4,7 | 1,1 | 51,7 | 0,5 |
| | | 3 | 4,6 | 1,4 | 64,5 | 0,84 |
| | | 5 | 4,57 | 1,43 | 65,5 | 0,78 |
| | | 10 | 4,5 | 1,55 | 68,6 | 0,68 |
| | | 20 | 4,2 | 1,69 | 71,0 | 0,45 |
| | | 40 | 4,4 | — | — | — |

волной [10] или другим способом [11]. При этом в силу того, что условия проведения опытов с самого начала подбираются близкими к критическим, то существует довольно большая длина, на которой потери энергии, связанные с затуханием ударной волны, компенсируются частичным реагированием ВВ, и поэтому процесс оказывается квазистационарным. Характерно, что переход к квазистационарному режиму при небольшом пересжатии или его затухание на больших длинах заряда, как правило, происходит не плавно, а скачками. Для примера на рис. 2 приведена фоторазвертка процесса распространения взрыва в заряде $d=36$ мм от инициатора № 2. На начальном участке (45 мм) скорость фронта постоян-

на и равна 3 км/с, а затем резко (на рисунке точка *A*) меняется до 1,80 км/с и проходит в данном опыте на всю длину заряда $8d$.

Можно было предполагать, что при постоянной скорости фронта происходят какие-либо изменения энерговыделения за фронтом, приводящие затем к резкому ускорению или затуханию фронта (например, догон сзади волн сжатия и разрежения). Однако серия измерений D и $u(t)$ на различных расстояниях в заряде $d=40$ мм (см. рис. 1, 3—6, таблицу) показала, что на участках с постоянным значением D и u весь профиль $u(t)$ оказывается одинаковым (см. рис. 1, 4, 5). В этой связи не ясно, что представляют собой такие квазистационарные режимы, сколь долго они могут существовать и почему затем развиваются или затухают. По-видимому, большое значение для них имеет близость скорости фронта инициируемого процесса к скорости звука, что обуславливает слабое затухание или развитие процесса и вызывает трудности экспериментального подтверждения стационарности. Если нормальные режимы детонации при достаточно мощном (параметры инициатора близки к параметрам детонации) инициаторе устанавливаются на расстояниях 2,5—3 диаметра, то для обнаружения нестационарности распространения взрывов с малой скоростью в зарядах без оболочек необходимы длины зарядов в десятки диаметров (в нашем случае 15—20*d*).

В заключение отметим следующее.

Для выбранных зарядов тротила минимальная скорость стационарной детонации составляет $\approx 4,1$ км/с, режимы же распространения взрыва с меньшими скоростями неустойчивы. В работе [4] путем измерения зависимости скорости детонации от диаметра заряда на ряде ВВ (ТНТ, гексоген, тетрил, ТЭН) насыпной плотности показано, что стационарных процессов распространения взрыва с промежуточными между минимальной для данной плотности нормальной и «малой скоростью детонации» ($4,2 \div 2,2$ км/с) нет. Из приведенных данных следует, что и «детонация с малой скоростью» нестационарна. Стационарным является лишь нормальный режим детонации заряда тротила $\rho_0 = 1,0$ г/см³ с минимальной скоростью фронта $\approx 4,1$ км/с.

Таким образом, если отбросить низкоскоростные процессы как нестационарные, то для ряда перечисленных порошкообразных ВВ плотностью $\approx 1,0$ г/см³ минимальная скорость детонации ($D_{кр}$) составляет около 4,0 км/с. При таких скоростях фронта в пористых ВВ ($\rho_0 = 1,0$ г/см³) на фронте детонационных волн развиваются давления $60 \div 100$ кбар и температуры ударного разогрева $\sim 1000 \div 1300^\circ$ К, что вполне достаточно для разложения ВВ за наблюдаемые времена реакции $\approx 0,2 \text{—} 0,6$ мкс [12]. Таким образом, для детонационных процессов всегда характерен высокий ударный разогрев всей массы ВВ (хотя, возможно, и неравномерный), для низкоскоростных же процессов распространения взрыва средний ударный разогрев ВВ мал, поэтому ВВ реагирует лишь частично в очагах. По-видимому, это является одним из важных факторов, отличающих детонацию от переходных процессов, и, следовательно, выводы о механизме и особенностях разложения ВВ при изучении низкоскоростных процессов можно переносить на режимы детонации с большой осторожностью.

Авторы благодарят В. И. Губанкову и С. Ф. Кузнецова за помощь в проведении экспериментов.



Рис. 2. Фоторазвертка процесса распространения взрыва с малой скоростью в заряде $d=36$ мм, инициатор № 2. Процесс распространения справа налево, до точки *A* скорость $D=3,0$ км/с, после — 1,8 км/с.

Поступила в редакцию
8/XII 1972

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 г/см³ и размером частиц 0,4÷0,63 мм. Диаметр зарядов варьировался от 21,5 до 30 мм, длина достигала 50 см, толщина плексигласовых оболочек $\delta=2,5\div 45$ мм. Оболочки тщательно полировались. МСД инициировалась ударной волной с амплитудой около 7 кбар, создаваемой взрывом промежуточного заряда содата 50/50 диаметром 30 мм.