

## О ДЕТОНАЦИИ ЛИТЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С МАЛОЙ СКОРОСТЬЮ

*И. В. Бабайцев, Б. Н. Кондриков,  
З. В. Паукова, В. Ф. Тышевич  
(Москва)*

При достаточно сильном инициировании детонация литых ВВ распространяется с высокой скоростью, соответствующей большой плотности заряда. Если интенсивность ударной волны мала, возникает процесс, распространяющийся с меньшей скоростью и либо быстро затухающий, либо развивающийся до высокоскоростной детонации [1—3]. Иная картина может быть получена, если ВВ помещено в прочную массивную оболочку [4]. При инициировании литых зарядов тротила в этих условиях возникал стационарный процесс, распространявшийся со скоростью около 2 км/сек (в 3,5 раза меньше идеальной) на расстояние до 25 см — около 30 диаметров заряда.

В настоящем сообщении рассматриваются результаты опытов, проведенных с целью дальнейшего исследования детонации литых ВВ с малой скоростью.

Опыты проводились с тротилом, составами тротил — гексоген и тротил — октоген (50/50) и диной, заливавшимися в разогретые до 60—70° С стальные трубки внутренним диаметром 9—15, длиной до 530, со стенками толщиной 10—15 мм. В качестве инициатора в большинстве опытов использовались небольшие (5 г) заряды смеси гексоген — NaCl (размеры кристаллов соответственно  $\sim 5-7 \cdot 10^{-3}$  и 0,2—0,3 мм) плотностью  $\sim 1,3$  г/см<sup>3</sup>, помещенные в стеклянные трубки диаметром 1 см<sup>1</sup>. Поскольку свечение низкоскоростного процесса с помощью СФР уловить не удалось (съемка проводилась через небольшие — диаметром 2 мм — отверстия в стенке трубки<sup>2</sup>), был применен косвенный способ оценки скорости по свечению взрыва небольших ( $\sim 10$  мг) навесок азида свинца, помещенных в отверстия, которые затем заполнялись аргоном и заклеивались прозрачной пленкой. Полученные таким образом снимки приведены на рис. 1.

В зависимости от мощности инициирования заряд детонирует с высокой или низкой скоростью или детонация не возбуждается. Та или иная картина процесса наблюдается для динь соответственно при инициировании смесями, содержащими 10, 12—13 и 20% гексогена, для составов тротил — гексоген и тротил — октоген — 10, 15 и 20%, для крупнокристаллического тротила — 20—30, 40—50 и 100%<sup>3</sup>.

Скорость распространения процесса в тротиле (см. рис. 1, а) после небольшого (3—4 см) участка замедления становится постоянной (1,8—2,2 км/сек) и остается такой по всей длине заряда (в первых опытах [4] до 30 диаметров, на рис. 1, а — до 60). Взрыв азида свинца может инициироваться ударной волной малой амплитуды, распространяющейся по не реагирующему веществу. Однако судя по следу продуктов детонации (см. рис. 1), волна реакции распространяется по заряду с той же скоростью. Подтверждением этого может служить постоянство ско-

<sup>1</sup> Скорость детонации таких зарядов приведена в работе [4].

<sup>2</sup> В работе [1] отмечается, что фотографирование детонации ТНТ со скоростью  $\sim 5$  км/сек невозможно без применения специальных методов съемки (опудривание заряда).

<sup>3</sup> Электродетонатор ЭД-8-56 инициирует в литом тротиле детонацию с малой скоростью; ЭД-202 — детонацию с малой скоростью при диаметре заряда 15 мм и, в части опытов, детонацию с высокой скоростью при диаметре 9 мм.

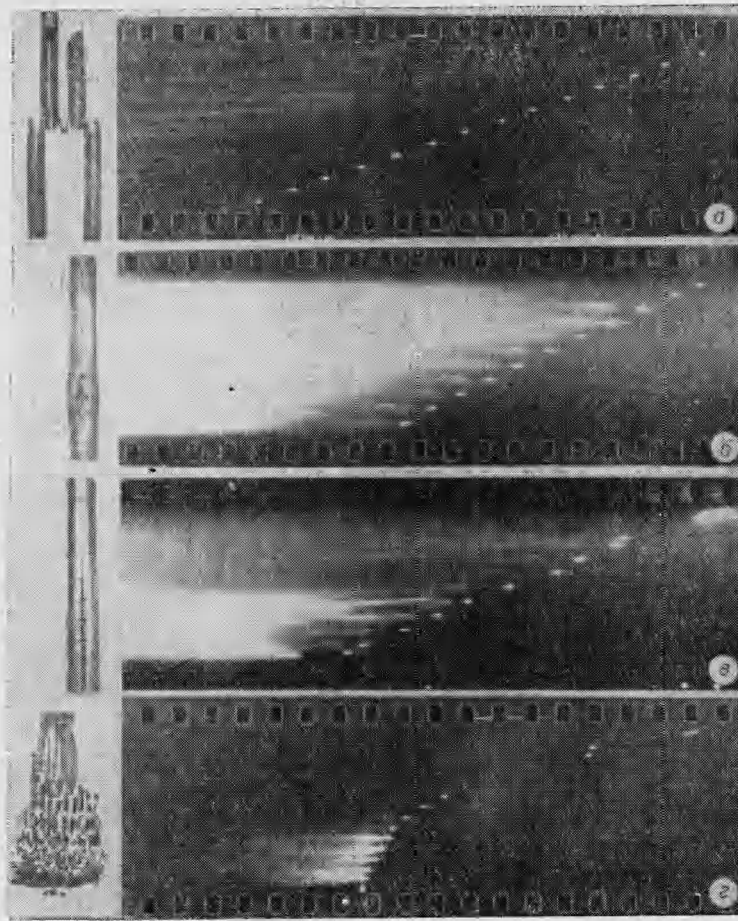


Рис. 1. Снимки на СФР и вид трубок после опыта. Диаметр заряда 9 мм, диаметр трубок 36 мм. Скорость развертки 7000 об/сек. а — тротил, содержание гексогена в инициирующей смеси (С) 50%, длина заряда (L) 53 см,  $D=2,2$  км/сек; б — тротил — гексоген 50/50; С=15%,  $L=32$  см,  $D=2,4$  км/сек; в — тротил — октоген, С=15%,  $L=28$  см,  $D=2,2$  км/сек (хорошо видно горение в ударной волне, отраженной от стальной плиты); з — дина, С=13%,  $L=28$  см (скорость процесса плавно увеличивается от 1,1 до 5 км/сек, на расстоянии 17 см от инициатора возникает детонация со скоростью 6,8 км/сек).

фрости процесса. Опытами с инертным веществом — нафталином — было показано, что скорость ударной волны, не поддерживаемой фронтом реакции, уменьшается (рис. 2).

Малая скорость детонации составов тротил — гексоген и тротил — октоген (см. рис. 1, б, в) приблизительно одинакова — 2,1—2,4 км/сек (диаметры зарядов 9 мм, длина до 30 диаметров). В части опытов при  $L=32$  см в конце заряда наблюдалось небольшое (до 2,5—2,7 км/сек) увеличение скорости процесса. В отличие от тротила для

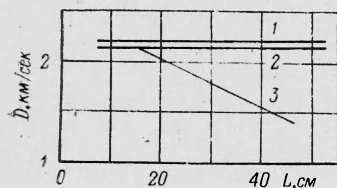


Рис. 2. Скорость распространения процесса в тротиле (1, 2) и в составном заряде: 16,5 см тротила, 37,5 см нафталина (3).

этих ВВ, а также для длины скорость ударной волны, распространяющейся при взрыве активного заряда, меньше малой скорости детонации, поэтому в начале заряда происходит некоторое увеличение скорости процесса. В случае дини (см. рис. 1, г) скорость процесса затем еще больше увеличивается, и при достаточной длине заряда (в опыте, изображенном на рис. 1, г — в 17 см от места инициирования) возникает детонация с высокой скоростью (6,8 км/сек).

Оболочка заряда при детонации с малой скоростью в большинстве опытов не разрушалась (канал ее бочкообразно раздувался), а в части из них и в большинстве опытов с составами тротил — октоген и тротил — гексоген давала трещину или разрывалась по образующей на 2—3 куска. При детонации с высокой скоростью оболочка дробилась на мелкие куски.

Для оценки давления детонации с малой скоростью проведено фотографирование ударных волн, распространяющихся в воде или в бло-

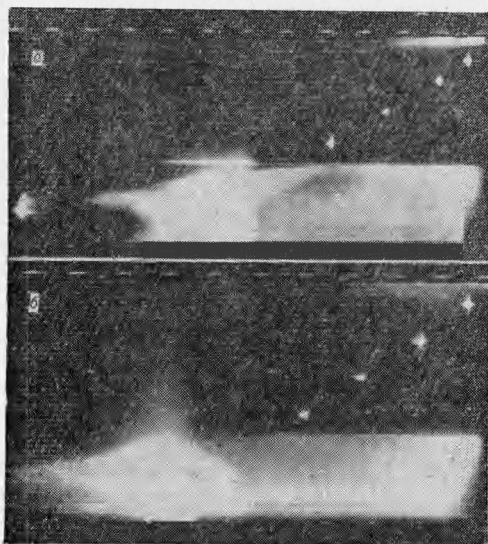


Рис. 3. Выход процесса в воду (а) и плексиглас (б). Заряд тротила диаметром 15 мм в трубке диаметром 36 мм. Длина заряда 12 см, скорость процесса по свечению азидов 1,7 (а) и 1,9 км/сек (б); ударная волна, вышедшая из металла, видна слабо.

ке из плексигласа, находившихся в контакте с торцом заряда (рис. 3). Опыты проводились с зарядами тротила диаметром 15 и длиной 110—120 мм. В воду или плексиглас (так же, как это отмечалось ранее для детонации нитроглицерина с малой скоростью [5]) первоначально выходит волна, распространяющаяся со скоростью звука по оболочке заряда (в наших опытах ~ 5 км/сек). Скорость распространения этой волны в воде составляет 1,5, а в плексигласе 2,6 км/сек, т. е. равна скорости звука. Затем выходит ударная волна, распространяющаяся по самому заряду, давление в которой составляет 5—8 кбар<sup>1</sup>. Интересно, что скорость перемещения поверхности раздела в течение некоторого времени увеличивается (приблизительно в 1,5 раза), что свидетельствует о нарастании давления за фронтом ударной волны.

При подходе ударной волны к открытому торцу заряда тротил приходит в движение, которое, как это видно из снимков, сделанных на фоне яркого экрана, также происходит с заметным ускорением. Движение тротила за торцом оболочки отчетливо видно также при покадровой съемке процесса. Фотографии, полученные в одном из таких опытов, приведены на рис. 4. Диаметр заряда в этом опыте составлял 15, длина 95 мм, заряд находился в трубке диаметром 36 мм, которая с одной (на снимке верхней) стороны имела плоскую поверхность (см. рис. 4). На снимке виден столбик вещества, движущийся относительно торца трубки, струя продуктов, выходящих через отверстие на плоской

<sup>1</sup> Высокая скорость детонации в этих условиях ~ 8 км/сек.

поверхности оболочки, а также струя, возникающая на переднем крае столбика и обгоняющая его. В другом опыте, с зарядом того же диаметра картина была в основном такой же, но образования обгоняющей струи не наблюдалось.

Существование детонационных режимов с пониженной скоростью обычно объясняют неполнотой реакции в детонационной волне. Очевидно, что так же обстоит дело и в случае литых зарядов. После про-

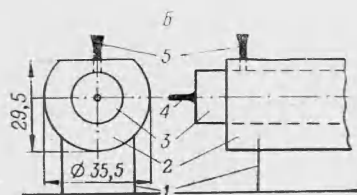


Рис. 4. Покадровая съемка (а) выхода процесса на торец заряда и схема опыта (б). Интервал между кадрами 8 мксек.

1 — подставка; 2 — оболочка; 3 — столбик тротила; 4 — струя, обгоняющая столбик тротила; 5 — струя, выходящая из оболочки.

ведения опыта неоднократно находили разбросанные обгоревшие кусочки тротила. При инициировании заряда, детонирующего с малой скоростью, с противоположного конца с помощью навески порошкообразного гексогена в нем возникает волна детонации, распространяющаяся на некотором (3—5 см) расстоянии и за фронтом низкоскоростной детонации (рис. 5). По-видимому, при детонации с малой скоростью не успевает прореагировать также часть продукта, выбрасываемая



Рис. 5. Столкновение детонации с малой и высокой скоростью в литом тротиле. *АВ* — участок повышенной скорости непосредственно за инициатором ( $C=40\%$ ), *БГ* — детонация с малой скоростью, *БГ'* — инициатор высокой скорости, *ГД* — детонация с высокой скоростью.

из трубки при подходе к открытому торцу заряда предварительной ударной волны. Если этот торец закрыть стальной пробкой или поставить трубку на стальную плиту, то эта часть продукта реагирует в отраженной ударной волне, вызывая сильное конусообразное расширение части трубки. На рис. 1, в видно яркое свечение в волне, отраженной от стальной плиты, помещенной на некотором расстоянии от открытого торца заряда.

Интересно отметить, что в трех опытах с зарядами тротила диаметром 15 мм в трубках, торец которых был закрыт плексигласовой пластиной, на стенках последних наблюдался четкий спиральный след, свидетельствующий о возникновении спинового процесса (рис. 6). Углубление в стали составляло в головной части волны  $\sim 0,5$  мм. Шаг спирали  $\sim 3$  см. Поскольку в зарядах с открытым торцом таких явлений ни в одном опыте не наблюдалось, можно предположить, что процесс возникает в веществе, непрореагировавшем в волне детонации с малой скоростью. В опытах, в которых торец был закрыт стальной или свинцовой преградой спирали на стенках трубки также не было. Это показывает, что возникновение спинового процесса возможно только при определенной акустической жесткости преграды (которая для плексигласа близка к акустической жесткости тротила).

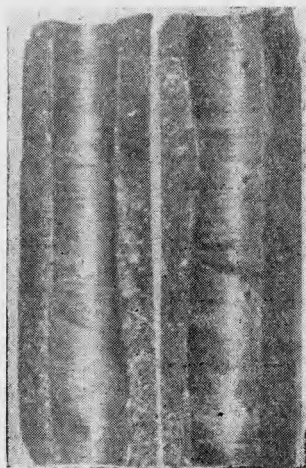


Рис. 6. Спиральный след на стенках стальной трубки (внутренний диаметр 15,5, внешний 34 мм, длина 12 см), разорванной при детонации литого ТНТ с малой скоростью. Трубка стояла на блоке из плексигласа.

Сопоставляя изложенные результаты с описанными в работах [6—8], можно предположить, что детонация литых ВВ с малой скоростью представляет собой распространение по заряду ударной волны малой амплитуды со следующей за ней зоной химической реакции. Эта последняя возникает с некоторой задержкой, которую можно сопоставить, например, с отмеченной в работе [3] задержкой возникновения электропроводности при прохождении по литому тротилу ударной волны малой (12 кбар) амплитуды. Соответственно невысокому давлению в волне реакции скорость распространения близка к звуковой. Роль оболочки в этих условиях сводится прежде всего к поддержанию давления в зоне реакции. При отсутствии оболочки распространение процесса было бы невозможно из-за разброса вещества в боковых волнах разре-

жения. Увеличение полноты реакции (например, вследствие затруднения отвода продуктов реакции через торец оболочки со стороны иницирования) может привести к повышению давления (ограничиваемому, по-видимому, пределом прочности оболочки) и ускорению процесса. Для дины применявшаяся длина заряда и толщина оболочки были достаточны для того, чтобы процесс перешел в детонацию с высокой скоростью.

Поступила в редакцию  
14/III 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Сооск. The science of high explosives. N. Y., 1956.
2. Г. Г. Ремпель. Сб. «Теория взрывчатых веществ». М., Оборонгиз, 1963.
3. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов. Сб. «Взрывное дело», № 62/60, М., «Недра», 1967.
4. И. В. Бабайцев, Б. Н. Кондриков, В. Ф. Тышевич. ФГВ, 3, 4, 1967.
5. А. В. Дубовик, И. М. Воскобойников, В. К. Боболев. ФГВ, 1966, 2, 4.
6. А. Масек. J. Chem. Phys., 1959, 37, 1.
7. R. W. Gipson, A. Масек. 8-th Symposium on Combustion, Pasadena, 1961.
8. D. Price, J. F. Wehener. Combustion and Flame, 1965, 9, 1.