

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЗРЫВА В ТОНКИХ СЛОЯХ ТВЕРДЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

*B. K. Боболев, A. B. Дубовик,  
I. A. Карпухин, B. B. Рыбаков  
(Москва)*

Известно, что при инициировании твердых ВВ в процессе развития взрыва часто возникают режимы взрывчатого превращения, распространяющиеся приблизительно с постоянными скоростями в диапазоне  $800 \div 2000 \text{ м/сек}$  на значительных длинах зарядов [1—4]. Эти скорости по порядку величины близки к скоростям звука в соответствующих веществах, но гораздо меньше скоростей нормальной детонации. В частности, такие режимы неизбежны при развитии взрыва в тонких слоях твердых ВВ, в случаях инициирования ударом, трением, искрой и т. д. Хотя после фундаментальных работ Ф. Бодена и других исследователей внешняя картина развития взрыва в тонких слоях выяснена достаточно хорошо, единого мнения относительно природы указанных выше режимов пока нет.

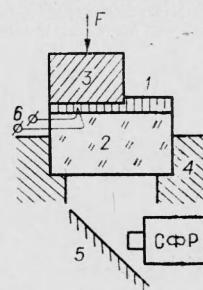
В настоящей работе предпринята попытка выяснить некоторые закономерности распространения взрыва в тонких слоях твердых ВВ большой плотности (относительная плотность  $\delta = 0,95 \div 0,97$ ), которые находятся под давлением между двумя прочными поверхностями. Эти условия весьма близки к условиям, имеющим место при ударе. Выяснение закономерностей распространения взрыва в тонких слоях тем более необходимо по той причине, что сейчас при оценке чувствительности того или иного ВВ совершенно недостаточно знать условия, при которых происходит возбуждение очагов реакции в процессе механического воздействия. Не менее важно знать и условия распространения взрыва от очага.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследование развития взрыва производилось на установке (рис. 1), которая ранее была описана в работе [3]. Тонкая прессованная пластина исследуемого ВВ размером  $20 \times 80 \text{ мм}$  и толщиной  $1 \div 7 \text{ мм}$  помещалась между прозрачным цилиндром и прямоугольным блоком, сделанным из органического стекла, и сдавливалась на прессе до  $100 \div 1500 \text{ атм}$ . Опыты производились с гексогеном, тэном, диной и другими ВВ. Инициирование осуществлялось нагревом или электриче-

*Рис. 1. Схема установки для изучения развития взрыва в тонких слоях твердых ВВ.*

*1 — слой ВВ; 2 — плексигласовый блок толщиной 30 мм; 3 — статическая нагрузка; 4 — металлический поддон; 5 — зеркало; 6 — инициирующая проволочка.*



ским взрывом тонкой никромовой (диаметром  $d = 15 \text{ мм}$ ) или медной ( $d = 0,05 \text{ мм}$ ) проволочки. При этом характер инициирования можно было менять в зависимости от величины импульса тока при разряде конденсатора через проволочку, которая монтировалась на поверхности цилиндра и во время эксперимента находилась в надежном кон-

такте с исследуемым ВВ. Расстояние от проволочки до края пластины ВВ составляло 15-20 мм, так что с момента инициирования развитие взрыва в веществе в течение нескольких микросекунд (в зависимости от постановки опыта) происходило в замкнутых условиях. Контрольные опыты с проволочками, установленными в центре заряда ВВ не внесли какого-либо изменения в наблюданную картину.

Регистрация процесса развития взрыва в слое ВВ осуществлялась через прозрачный цилиндр скоростным фоторегистром СФР-2М.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Как показали опыты, общая качественная картина развития взрыва в тонком слое ВВ без учета качественных расхождений в параметрах процесса сохраняется для всех исследованных веществ (рис. 2).

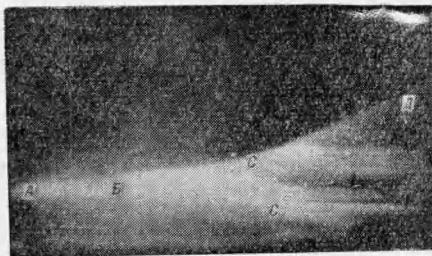


Рис. 2. Типичная фоторазвертка процесса развития взрыва в тонком слое твердого ВВ.

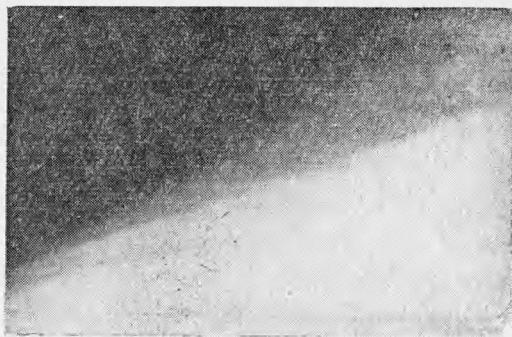


Рис. 3. Распространение низкоскоростной детонации ( $D \approx 1000$  м/сек) в ВВ.

С момента инициирования ВВ взрывом проволочки (A) по веществу распространяется взрывчатое превращение со сравнительно низкой скоростью (несколько десятков метров в секунду; участок AB). В течение очень короткого промежутка времени ( $\tau \approx 10$  мксек) скорость распространения взрыва по веществу резко возрастает и на расстоянии около 5-15 мм от очага инициирования достигает величины сотен метров в секунду (участок BC). Дальнейший рост скорости вплоть до  $D \approx 1000$  м/сек характеризуется, как правило, крутым изменением наклона записи свечения на фотографии процесса. Вслед за этим в зависимости от свойств исследуемого ВВ скорость распространения взрыва или продолжает далее плавно нарастать до конца заряда, или временно стабилизируется (участок CD). Второй случай обычно имеет место при исследовании мощных ВВ, таких, например, как тэн. Нередко на фоторазвертке процесса развития взрыва на стадии его распространения в установившемся режиме  $D \approx 1000$  м/сек можно наблюдать, как впереди ярко светящегося фронта возникают отдельные локальные вспышки (рис. 3).



Рис. 4. Переход низкоскоростного режима ( $D \approx 1000$  м/сек) в нормальную детонацию.

Интересно отметить, что для мощных ВВ даже на сравнительно небольших базах измерений (не бо-

лее 80 мм) часто происходил внезапный переход низкоскоростного режима ( $\sim 1000$  м/сек) в нормальную детонацию (рис. 4). При этом можно наблюдать два случая формирования нормальной детонации: на самом фронте низкоскоростного режима или несколько позади его (на расстоянии порядка нескольких толщин заряда).

Описанная выше картина развития взрыва сохраняется и в том случае, если инициирование осуществляется не взрывом проволочки, а ее кратковременным нагревом. Единственное отличие состоит в том, что процесс развития взрыва затягивается во времени, особенно на начальной его стадии.

Для выяснения механизма наблюдаемого процесса развития взрыва в тонких слоях и в первую очередь природы установившихся низкоскоростных режимов было проведено несколько серий экспериментов.

**Изучение природы низкоскоростных режимов ( $D \approx 1000$  м/сек).** Наиболее простым способом ответить на вопрос, имеет ли данный процесс волновой характер (как это наблюдалось, например, при детонации с малой скоростью [5]) или является одним из видов горения, могут служить опыты по передаче данного режима через инертную преграду. В наших опытах преграды из стали, меди и латуни (толщиной от 0,4 до 3 мм) помещались по плоскости разреза цилиндра и прямоугольного блока, перекрывая все сечение сборки. Обе части разрезанного цилиндра и преграда соединялись болтами. Пластины ВВ плотно прижимались с обеих сторон к преграде. Такая конструкция полностью устраивала возможность передачи процесса через преграду при горении и оставляла ее для режимов, носящих волновой характер.

Условия проведения опытов подбирались таким образом, что к преграде процесс распространения взрыва мог подходить на разных стадиях его развития. Это достигалось либо изменением мощности инициирования, либо преграда помещалась на разных расстояниях от инициирующей проволочки. Опыты показали, что для каждого исследуемого ВВ имеется пороговая скорость распространения процесса, выше которой он передается за преграду и с небольшой задержкой ( $\tau \approx 10-20$  мксек) возобновляется за ней почти с той же скоростью. Правда, в начальный момент ее величина все же меньше той, с которой

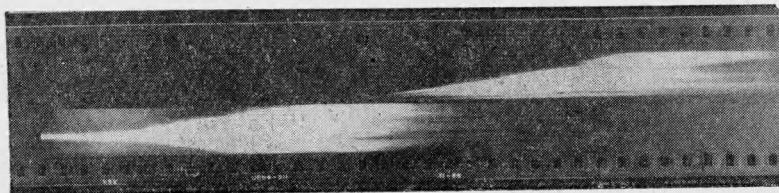


Рис. 5. Передача низкоскоростного режима со скоростью распространения больше пороговой скорости через инертную преграду.

процесс подошел к преграде, что, естественно, можно объяснить некоторым ослаблением волны (рис. 5). Если скорость процесса при подходе к преграде оказывалась ниже пороговой, то процесс обрывался, а за преградой вещество оставалось целым. Следует отметить, что при передаче процесса через достаточно толстую преграду ( $\sim 2$  мм) она не теряла свою сплошность. Как правило, процесс передавался через преграду в том случае, когда его скорость в установленном режиме была равна примерно 1000 м/сек. Например, для тэна пороговая скорость в наших опытах была приблизительно 700—800 м/сек.

Эти опыты достаточно убедительно говорят о том, что наблюдаемые режимы установившегося распространения взрыва ( $800$ — $2000$  м/сек) имеют волновую природу, а на более ранних стадиях развития — характер горения. Чтобы выяснить структуру волны, была проведена вторая серия экспериментов по определению ее профиля и измерению амплитуды давления.

**Изучение профиля волны и механизм распространения.** Одним из наиболее доступных методов определения профиля волны является электромагнитный метод. Условия проведения эксперимента аналогичны тем, которые осуществлялись при фоторегистрации процесса, с той лишь разницей, что в заряд помещался тонкий (толщиной  $\sim 0,07$  мм) П-образный алюминиевый датчик. Для повышения точности измерений потребовалось увеличить толщину пластины ВВ до  $6$ — $7$  мм. Контрольные опыты показали, что введение датчика в заряд ВВ не нарушает общей картины развития взрыва, в частности, на стадии установившегося распространения взрывчатых превращений со скоростью  $\sim 1000$  м/сек. Следует отметить, что полученные записи движения вещества при распространении установленных низкоскоростных процессов, не претендуя на высокую точность измерений, тем не менее достаточно правильно, на наш взгляд, дают представление об общей картине явления. Типичная осциллограмма приведена на рис. 6.

Характерной чертой профиля регистрируемого волнового возмущения в исследуемом веществе является постепенное нарастание давления до максимального значения в зоне взрывчатого превращения, что существенным образом отличает его от профиля нормальной детонационной волны. Заметим, что волны с конфигурацией профиля, напоминающего рассмотренный выше, часто регистрируются при взрывах в грунтах и горных породах, что обычно связывается с нелинейным характером деформации этих сред при нагрузках, вызываемых взрывом [6]. Примени-

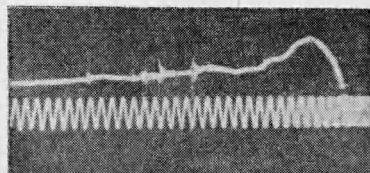


Рис. 6. Типичная осциллограмма профиля волны сжатия при установившемся режиме распространения со скоростью 1200 м/сек. Максимальная амплитуда давления в волне  $\sim 5$  кбар, частота генератора меток времени 500 кгц.

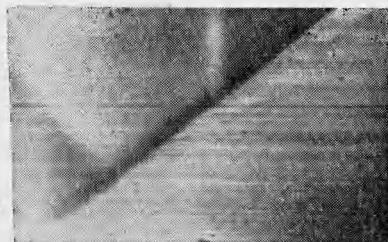


Рис. 7. Распространение установленного режима со скоростью 1000 м/сек в тонком слое литого тэна на фоне ярко светящегося экрана.

тельно к нашему случаю существование волнового возмущения с постепенно нарастающим давлением во фронте, по-видимому, можно объяснить аналогичным образом. На ранних стадиях развития взрыва по веществу, лежащему впереди ускоряющегося фронта пламени, распространяются волновые возмущения в виде простых волн сжатия со все возрастающей амплитудой давления. Слабые возмущения, не нарушающие структуру среды, распространяются со скоростью, соответствующей скорости звука в данном веществе. Вслед за ними по веществу распространяются волны с несколько более высоким давлением (выше предела

упругости среды). При этих давлениях ВВ начинает необратимо деформироваться и терять свою начальную прочность, в соответствии с чем возмущения, передающие более высокие давления, распространяются с меньшей скоростью.

Свидетельством того, что в идущей впереди фронта воспламенения волне сжатия действительно имеют место деформация и разрушение заряда ВВ, может служить рис. 7. Темная область на фотограмме впереди фронта воспламенения соответствует зоне деформации и разрушения первоначально прозрачного и однородного ВВ. Уместно напомнить, что при механических воздействиях и, в частности, при ударе возбуждение взрыва происходит именно при прочностном разрушении заряда ВВ, если при этом напряжения в ВВ превышают некоторую величину, называемую критической [7].

Если теперь представить, что в волне сжатия образование очагов реакций имеет подобную природу, то можно надеяться на разрешение вопроса о механизме распространения указанных низкоскоростных режимов.

Рассмотрим факты, которые говорят в пользу

предполагаемого механизма. Прежде всего следует отметить, что на рис. 3 впереди фронта пламени зарегистрированы отдельные локальные вспышки, которые можно связать с образованием в этих местах очагов реакции в волне сжатия. Такую же картину можно наблюдать при покадровой съемке процесса передачи взрыва через преграду. За преградой вспыхивают сначала отдельные очаги реакции и только затем формируется фронт воспламенения. Еще более показательны в этом отношении опыты с азидом свинца. Помещенный в виде маленьких вкраплений в заряде ВВ на пути распространения установившегося процесса, азид свинца взрывается в волне сжатия на заметном расстоянии ( $\sim 7 \text{ мм}$ ) впереди фронта воспламенения (рис. 8).

С помощью электромагнитного метода была сделана оценка величины максимальных давлений, реализующихся во фронте низкоскоростных режимов. Для различных ВВ эти давления равны 2—5 кбар. Отметим, что такой же порядок величины имеют и известные критические напряжения при механических воздействиях для мощных вторичных ВВ [7].

**Исследование характера устойчивости низкоскоростных режимов.** Выше упоминалось, что в некоторых случаях низкоскоростные режимы могут распространяться без заметного изменения скорости ( $\pm 10\%$ ) на значительные расстояния вдоль заряда (в наших опытах до 50 см). Тем не менее об устойчивости этих режимов можно говорить в относительной форме. При покадровой съемке видно, что поверхность фронта воспламенения установившегося низкоскоростного процесса время от времени изменяется, при этом отдельные его участки могут несколько опережать или, наоборот, отставать относительно других. По-видимому, такое явление можно связать с неоднородностью плотности вещества по длине заряда, а следовательно, и с изменением его прочностных характеристик. На участке с меньшей плотностью процесс ускоряется. Если инициировать взрыв в заряде, плотность которого на отдельных участках различна, то при переходе установившегося режима  $D \approx 1000 \text{ м/сек}$  из участка заряда высокой плотности ( $\delta = 0,96$ ) на участ-



Рис. 8. Взрыв азода свинца впереди фронта воспламенения.

сток заряда с меньшей плотностью ( $\delta=0,8$ ) в последнем происходит ускорение процесса, заканчивающееся переходом к нормальной детонации.

Об этом же свидетельствуют опыты с выходом низкоскоростного режима из поджатого слоя в неподжатый разной плотности. В этих опытах одна часть заряда находилась под нагрузкой, а другая свободно помещалась на плексигласовом цилиндре.

При выходе процесса взрывчатых превращений из поджатого слоя большой плотности в малоплотный неподжатый слой всегда наблюдалось резкое ускорение процесса и переход его в детонацию с большой скоростью [3]. Если указанный процесс входит в неподжатый слой большой плотности, то ускорение наблюдается только вблизи границы этих зон, а затем процесс постепенно замедляется и затухает. Описанная выше картина имеет место и тогда, когда на выходе из поджатой зоны скорость процесса превышает пороговую скорость.

Эти процессы легко понять, учитывая особенность профиля волны сжатия. Когда волна с постепенно нарастающим давлением во фронте встречает на своем пути среду с меньшей плотностью (т. е. с более высокой сжимаемостью), начальные участки волны с меньшим давлением распространяются по ней с небольшой скоростью, уплотняя ее. Следующие участки волны с большим давлением двигаются по более плотной среде быстрее и т. д. Таким образом, при выходе из поджатой зоны в неподжатую установившийся низкоскоростной режим разрушается: волна сжатия быстро (в течение 10–20 мксек) трансформируется в ударную волну с крутым передним фронтом и инициирует в неподжатом слое ВВ нормальную детонацию, если давление во фронте ударной волны больше давления инициирования данного ВВ в этих условиях. Действительно, давление во фронте установившегося низкоскоростного режима, выходящего в неподжатый слой малой плотности, составляет, как отмечалось выше, величину порядка 2–5 кбар. По данным работы [8], давление инициирования ударной волной порошкообразного тэна с плотностью 1,0 г/см<sup>3</sup> около 2,5 кбар.

При переходе установившегося режима из поджатого слоя ВВ в неподжатый слой такой же высокой плотности наблюдается постепенное затухание взрыва. Существенным обстоятельством, влияющим на этот процесс, является отсутствие оболочки у неподжатого заряда. С другой стороны, затухание процесса в неподжатом слое ВВ происходит всегда, когда скорость распространения взрывчатого превращения в поджатой зоне оказывается ниже пороговой [3].

Изложенные факты свидетельствуют о том, что на определенной стадии развития взрыва возможны режимы, которые при некоторых условиях имеют приблизительно постоянную скорость на длинах зарядов, в десятки раз превышающих их характерную толщину. Тем не менее устойчивость таких режимов может быть нарушена влиянием таких факторов, как изменение характера оболочки заряда, вариация плотности ВВ по длине заряда, введение частиц примесей [5] и т. д.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании известных литературных данных [1–4] и результатов описанных выше опытов можно следующим образом представить себе весь процесс развития взрыва в тонких слоях твердых высокоплотных ВВ.

При локальном инициировании тонкого слоя ВВ, находящегося под нагрузкой между прочными поверхностями, процесс развития взрыва начинается в форме достаточно медленного горения. Важным обстоятельством, благоприятно сказывающимся на развитие процесса, является замкнутость объема, в котором произошло инициирование. Выделяющиеся при горении газообразные продукты разложения резко повышают давление в объеме прореагировавшего вещества. Повышение давления служит причиной принудительного проникновения горячих продуктов горения внутрь не охваченного реакцией разложения вещества и его воспламенения, что приводит к дальнейшему повышению давления и скорости горения. Развитие процесса на этом этапе носит лавинообразный характер и быстро увеличивает скорость распространения пламени до сотен метров в секунду. При этом, находясь в замкнутом объеме, продукты горения двигаются от очага инициирования вслед за ускоряющимся фронтом пламени и подобно поршню формируют переди себя волну сжатия. По мере ускорения фронта пламени амплитуда волн сжатия увеличивается. При достаточной интенсивности волны она вызывает деформацию и разрушение слоя ВВ перед фронтом пламени.

В процессе деформации ВВ в зоне, подвергнутой волновому сжатию, образуются очаги реакции подобно тому, как возникают очаги реакции при механических воздействиях на ВВ. Образование очагов в волне сжатия является тем условием, которое определяет возможность дальнейшего распространения взрыва. Развитие очагов приводит к формированию фронта воспламенения, который, в свою очередь, становится источником дополнительной подпитки волны сжатия, компенсируя ее ослабление. Таким образом, когда скорость процесса становится приблизительно постоянной и равной 800—2000 м/сек, во взрывчатом веществе распространяется волна сжатия с давлением, достаточным для инициирования в отдельных очагах химической реакции.

При сохранении энергетического баланса между выделившимся теплом в волне и теплопотерями процесс распространения взрывчатого превращения стабилизируется. Если условия проведения опытов исключают возможность трансформации указанной выше конфигурации профиля волны сжатия в ударную волну с крутым передним фронтом, то, по-видимому, такой режим может носить устойчивый характер на некоторой длине заряда. Существует ряд факторов, которые влияют на устойчивость низкоскоростных режимов. Одним из них, как это следует из наших опытов, является изменение плотности по длине заряда. Другим фактором может быть изменение характеристик оболочки заряда и т. д. Существенное влияние на устойчивость режима оказывает, на наш взгляд, неполнота реакции взрывчатого превращения вещества во фронт волны.

С этих позиций можно предполагать, что в очень длинных зарядах ВВ стационарное распространение низкоскоростных режимов окажется невозможным.

Итак, можно видеть, что низкоскоростные режимы, распространяющиеся со скоростями 800 : 2000 м/сек в тонких слоях ВВ, скрывают в себе большую опасность, если иметь в виду, что они часто реализуются при ударе. Эта опасность еще более усугубляется, если имеется возможность выхода такого режима в малоплотную массу ВВ, окружающую область воздействия.

Поступила в редакцию  
14/III 1969

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Боуден, А. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидкых ВВ. ИЛ, 1958.
2. А. Масек. J. Chem. Phys., 1959, 31, 162.
3. В. К. Боболев, А. В. Дубовик. ПМТФ, 1965, 2.
4. D. Price, J. Wehneg. Combustion and Flame, 1965, 9, 1.
5. А. В. Дубовик. Канд. дисс., ИХФ АН СССР, 1966.
6. Г. И. Покровский, И. С. Федорова. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. Госстройиздат, 1957.
7. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев и др. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
8. G. Seay, L. Seay. J. Appl. Phys., 1961, 32, 1092.

УДК 662.215.1+534.222.22

## ДЕТОНАЦИЯ ПОРИСТЫХ ВВ

B. A. Веретенников, A. H. Дремин, K. K. Шведов  
(Москва)

Параметры детонационной волны и возможность ее устойчивого распространения в конденсированных ВВ существенно зависит не только от химических свойств, но и от физических факторов (плотность заряжания, диаметр заряда, исходная структура ВВ и т. п.). Их влияние нельзя объяснить без привлечения конкретного механизма возбуждения и протекания химической реакции во фронте детонационной волны. Здесь рассматриваются данные исследования механизма детонационного превращения пористых твердых ВВ, позволяющие ограничить круг возможных предположений о механизме возбуждения и протекания реакции разложения твердых ВВ и выдвинуть новые качественные представления, на основе которых делается попытка объяснить наблюдаемые особенности распространения детонации в зарядах конечных размеров.

Для твердых ВВ, в особенности порошков, широкое распространение получили представления о том, что разложение ВВ инициируется на поверхности частиц горячими продуктами реакции и нагретым при сжатии воздухом, заполняющими поры; на весь объем ВВ реакция распространяется в форме горения [1—3]. Такая модель была названа механизмом «взрывного горения». Иные представления развиты в работе [4], авторы которой считают, что ударная волна способна инициировать реакцию в отдельных очагах (местах контакта исходных частиц), а весь остальной объем ВВ сгорает с некоторой линейной скоростью. При таком механизме разложения время реакции определяется скоростью теплопередачи, при этом начальный размер частиц ВВ является важным кинетическим параметром.

Прямых экспериментальных данных, доказывающих справедливость механизма «взрывного горения», нет. Обычно в качестве доказательств используются косвенные факты [6] и, в частности, зависимость скорости горения ВВ от давления. Но поскольку скорость горения ВВ при очень высоких давлениях не известна, то экстраполяция ее из области малых давлений (4—10 тыс. atm) в условия детонации ( $p \approx 100$ — $200$  тыс. atm) [5, 6] не обеспечивает значений скорости, необходимых для того, чтобы реальные частицы ВВ (0,1—1,0 мкм)