

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ БАЛЛИСТИТНЫХ ПОРОХОВ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

А. Н. Афанасенков

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка

В известной постановке опыта: активный заряд — преграда — заряд исследуемого ВВ — определены критические давления ударных волн, инициирующих детонацию зарядов баллиститных порохов. В качестве активных ВВ использовались заряды тротила разной плотности, в качестве преграды — медные пластины толщиной 5 мм. Построена зависимость давления ударной волны, воздействующей на порох, от плотности тротила, по которой легко определяли значение критического давления, зная только плотность активного заряда. Установлено, что по чувствительности к ударной волне баллиститные пороха близки к жидким ВВ; для них критическое давление составляет  $6,0 \div 9,0$  ГПа при диаметре заряда 40 мм и уменьшается с увеличением диаметра. На примере пороха НДТ-2 показано, что использование пороховых изделий в заводской упаковке в линейных зарядах может приводить к отказу в передаче детонации от одного заряда пороха к другому.

Наряду с такими характеристиками взрывчатого вещества (ВВ), как скорость и давление детонации, работоспособность и др., большое значение имеет критическое давление инициирования детонации ВВ ударной волной ( $p_{cr}$ ). Знание этой характеристики необходимо при проектировании контейнеров для перевозки и переноски ВВ, расчета складов хранения, при изучении передачи детонации от одного заряда к другому, для расчета параметров зарядов-боевиков, необходимых для надежного инициирования скважинных зарядов, и т. п. Однако результаты экспериментального определения  $p_{cr}$  для одного и того же ВВ часто различаются, поскольку отличны условия проведения опытов (различные плотности и дисперсности ВВ, диаметры зарядов и т. д.) [1]. Инициированию детонации бризантных ВВ ударными волнами посвящено большое количество работ (см. обзор [2]), а для коллоидных порохов имеются только отрывочные данные [3, 4].

В последнее десятилетие в связи с конверсией оборонной промышленности высвобождается значительное количество коллоидных порохов (артиллерийских, ракетных), одним из путей утилизации которых является использование их во взрывном деле в качестве водостойких ВВ или как компонентов новых промышленных ВВ. Предполагается применять их как в чистом виде, так и в виде первоначальных изделий (боеприпасов) [5]. Это направление ути-

лизации порохов является оптимальным, поскольку промышленные ВВ имеют устойчивый рынок сбыта, потребность в них достаточно велика (примерно миллион тонн в год); ощущается дефицит водостойких ВВ [6]. Использование порохов в качестве промышленных ВВ вызывает необходимость разработки соответствующих зарядов-боевиков (промежуточных детонаторов), способных инициировать полноценную детонацию пороховых зарядов. Решение этой задачи облегчается, если известна чувствительность пороха к ударной волне, т. е. значение  $p_{cr}$ .

В данной работе приводятся результаты определения  $p_{cr}$  для ряда баллиститных порохов (пироксилиновые составы нами не исследовались). Опыты проводили по известной схеме: активный заряд — металлическая преграда — заряд исследуемого пороха (рис. 1). В качестве активных использовались тротильные заряды разной плотности, в качестве преграды — пластины из меди толщиной 5 мм. Образцы порохов представляли собой сплошные однородные цилиндры различных диаметров, высотой 80 мм. Давление ударных волн в баллистите рассчитывалось методом отражения (рис. 1, б). При взрыве активного заряда в преграду (I) входит ударная волна  $O1'$  с массовой скоростью  $u_1$ . При выходе на границу с порохом она отражается и в порох (II) входит ударная волна  $O2'$ . Считается, что изоэнтропа разгрузки металла  $1'-2'-w$  симметрична его ударной

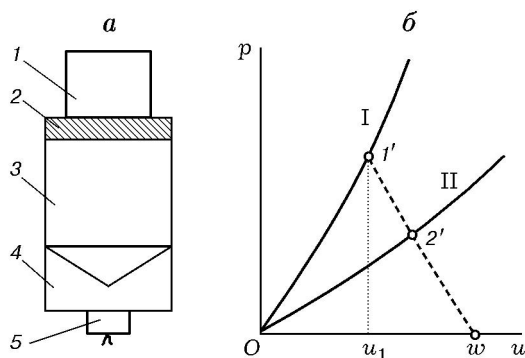


Рис. 1. Схема опыта по определению  $p_{cr}$  (а) и графическая интерпретация опыта (б):

1 — исследуемый порошок; 2 — преграда; 3 — активный заряд; 4 — линза, формирующая плоский фронт детонации; 5 — детонатор; I — ударная адиабата материала преграды, II — ударная адиабата пороха; 1' — состояние в ударной волне в преграде; 2' — состояние в ударной волне в порохе;  $u_1$  — массовая скорость,  $w$  — скорость свободной поверхности преграды

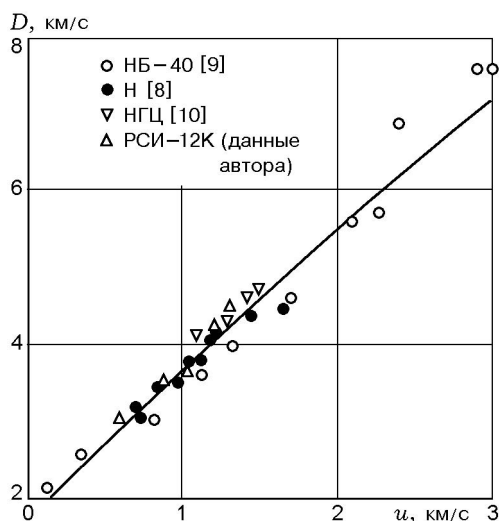


Рис. 2. Обобщенная ударная адиабата баллиститов:

линия — расчетная адиабата НГЦ ( $D = 1,73 + 2u - 0,1u^2/1,73$  [км/с] [1]), точки — эксперимент

адиабате (I). Ударная адиабата меди известна и в координатах  $p, u$  записывается в виде  $D = 4,0 + 1,5u$  [км/с] [7]. Для нитроглицериновых порохов использовалась единая ударная адиабата — адиабата нитроглицерина (НГЦ), рассчитанная по обобщенной зависимости  $D = c_0 + 2u - 0,1u^2/c_0$ , где  $c_0$  — адиабатическая скорость звука [1]. Для НГЦ расчет по правилу Рао дает величину  $c_0 = 1730$  м/с [1]. На рис. 2 приведены ударная адиабата НГЦ и опытные данные по ударной сжимаемости баллистит-

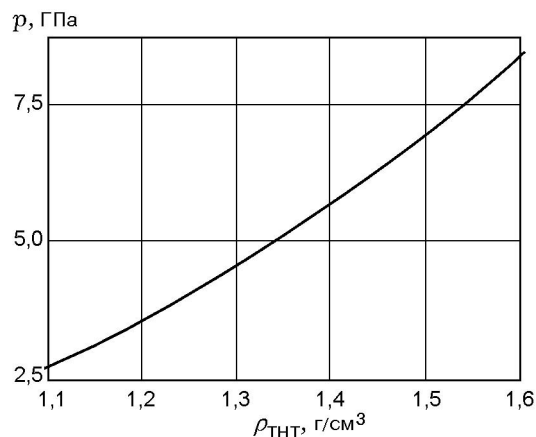


Рис. 3. Зависимость давления инициирующей ударной волны в порохе от плотности активного заряда тротила

ных порохов Н [8], НБ-40 [9] и РСИ-12К (наши данные) и самого НГЦ [10]. Как видим, все данные описываются одной зависимостью. Наличие единой ударной адиабаты для баллиститов, по-видимому, связано с тем, что их компонентный состав практически одинаков и, следовательно, одинакова динамическая сжимаемость. Они содержат  $56 \div 60\%$  коллоксилина,  $25 \div 35\%$  нитроглицерина,  $5 \div 12\%$  динитротолуола,  $3\%$  централита, т. е. в среднем состав на  $95\%$  один и тот же. Наличие небольшого количества технологических добавок ( $2 \div 5\%$ ) не сказывается на сжимаемости пороха в опыте. Составы некоторых баллиститов приведены в работе [11].

Зависимость массовой скорости  $u_1$  на выходе из медной преграды толщиной 5 мм (точка 1' на рис. 1) от плотности активного заряда тротила приведена в работе [12].

Давление ударных волн, действующих на порох (точка 2' на рис. 1) при взрыве зарядов тротила разной плотности, рассчитывали, используя данные [12] и обобщенную ударную адиабату порохов (см. рис. 2). Результаты представлены на рис. 3. С этими данными измерение давления  $p_{cr}$  сводится к экспериментальному определению (обычно в трех параллельных опытах) минимальной плотности тротилового заряда, при которой порох взрывается ( $\rho_+$ ), и максимальной плотности, при которой он не взрывается ( $\rho_-$ ). Саму величину  $p_{cr}$  находят по рис. 3. В качестве критического берут либо давление взрывов ( $p_+$ ), либо давление отказов ( $p_-$ ) (мы придерживаемся первого определения).

| Порох   | $\rho_+/\rho_-, \text{ г/см}^3$ | $p_+/p_-, \text{ ГПа}$ | $d_{cr}, \text{ мм}$ |
|---------|---------------------------------|------------------------|----------------------|
| РСТ-4К  | 1,41/1,40                       | 5,8/5,7                | 2,0                  |
| РНДСИ   | 1,46/1,44                       | 6,5/6,2                | 5,0                  |
| РСИ-12К | 1,51/1,48                       | 7,1/6,7                | 5,0                  |
| НБ-40   | 1,61/1,58                       | 8,6/8,1                | 10*                  |
| РАМ-10  | 1,60/1,58                       | 8,4/8,1                | 14                   |
| Н       | 1,59/1,58                       | 8,2/8,1                | 28**                 |

Примечание. \*По данным [13]; \*\*по данным [14].

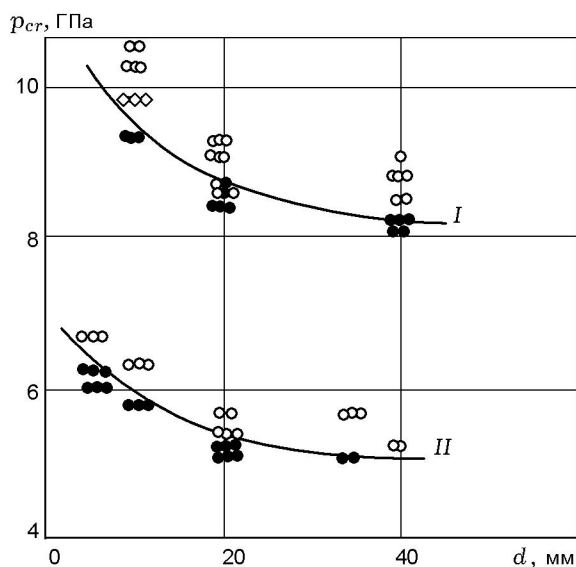


Рис. 4. Зависимости  $p_{cr}$  от диаметра заряда для пороха НБ-40 (I) и РСТ-4К (II):  
 ○ — взрыв, ● — отказы, ◇ — переходный режим

Результаты настоящей работы представлены в таблице и на рис. 4, 5. В таблице приведены значения  $p_{cr}$ , соответствующие как взрывам пороха, так и отказам, а также плотности активных зарядов. Размеры зарядов для всех порохов были одинаковыми: диаметр 40 мм, высота 80 мм, плотность порохов принята равной  $1,60 \text{ г/см}^3$ ; размеры активного заряда: диаметр 40 мм, высота (вместе с линзой плоско-фронта) 60 мм. В таблице также приведены значения критического диаметра детонации пороха ( $d_{cr}$ ). Использовались пороха со сроком хранения на складе  $\approx 10$  месяцев. На рис. 4 приведены зависимости  $p_{cr}$  от диаметра заряда ( $d$ ) для пороха НБ-40 и свежеприготовленного пороха РСТ-4К. Для пороха НБ-40 вблизи значения  $d = d_{cr}$  наблюдался переходной режим, скорость которого на начальном участ-

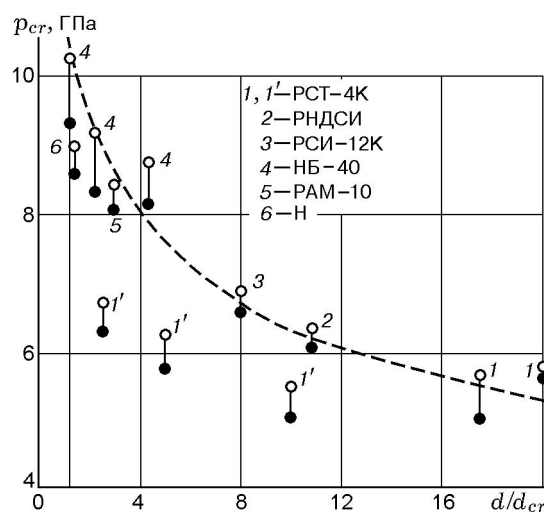


Рис. 5. Зависимости  $p_{cr} (d/d_{cr})$  для баллиститов:  
 1-6 — срок хранения порохов  $\approx 10$  месяцев, 1' — свежеприготовленный РСТ-4К

ке равна скорости инициирующей ударной волны ( $\approx 4,1 \text{ км/с}$ ). Далее она уменьшалась, но взрывной процесс охватывал всю длину заряда. С ростом диаметра заряда наблюдается тенденция к выполаживанию зависимости  $p_{cr}$ . В то же время известно, что скорость детонации сплошных гомогенных баллиститов не зависит от диаметра заряда [13]. Из полученных данных следует, что величина  $p_+$  ударной волны, возбуждающей детонацию пороха в критических условиях ( $d/d_{cr} = 1$ ), в два раза меньше, чем давление детонации пороха. Для пороха Н давление детонации составляет  $20,4 \text{ ГПа}$  [14] (для чистого НГЦ —  $25,0 \text{ ГПа}$  [10]).

Была предпринята попытка обобщить экспериментальные результаты с целью получения единой зависимости для всех порохов. Результаты приведены на рис. 5. Для всех порохов, срок хранения которых на складе был одинаков:  $\approx 10$  месяцев, результаты можно описать единой зависимостью  $p = 11,2(d/d_{cr})^{-0,25} [\text{ГПа}]$ . По этой зависимости можно оценивать давление  $p_{cr}$  заряда пороха, если известен его критический диаметр детонации. В то же время свежеприготовленный порох РСТ-4К (срок хранения 1 месяц) имеет большую чувствительность к ударной волне. Возможно, это связано с удалением растворителя из пороха при хранении. Однако есть и другое объяснение. Порох РСТ-4К содержит до 5% порошков оксидов тяжелых металлов,

частицы которых могут играть роль «горячих точек», облегчающих возбуждение детонации [2].

Из уравнения зависимости, описывающей экспериментальные данные, следует, что давление ударной волны, возбуждающей детонацию пороха в критических условиях ( $d/d_{cr} = 1$ ), не превышает 11,2 ГПа, что примерно в 1,8 раз меньше давления детонации сплошного пороха ( $\approx 20,4$  ГПа [14]). Возможно, это значение давления является предельным при иницировании детонации баллистических порохов ударными волнами.

Отметим, что для того, чтобы возбудить детонацию пороха ударом летящего осколка, т. е. создать в нем ударную волну интенсивностью  $p_+$  (точка 2' на рис. 1, б), скорость полета осколка должна быть не меньше  $w = 2u_1$ .

Чтобы широко использовать конверсионные баллистические пороха в качестве водостойких промышленных ВВ, необходимо обеспечить надежное иницирование их детонации. Для этой цели в [15] рекомендуется использовать заряды-боевики (промежуточные детонаторы) из патронов порошкообразного аммонита 6ЖВ или стандартные тротилловые шашки Т-400. Была проведена оценка давления ударной волны  $p_{sh}$ , входящей в заряд сплошного пороха, при контактном взрыве указанных боевиков на поверхности заряда. Рассчитывались изоэнтропы продуктов взрыва аммонита 6ЖВ при плотности  $1,0$  г/см<sup>3</sup> и тротила при плотности  $1,55$  г/см<sup>3</sup>, и согласно рис. 1, б по точке пересечения изоэнтроп с ударной адиабатой пороха определялось значение  $p_{sh}$ . В случае аммонита 6ЖВ  $p_{sh} = 11,5$  ГПа, а для тротила —  $16,0$  ГПа (в водонаполненном порохе значение  $p_{sh}$  несколько меньше —  $10,8$  и  $15,0$  ГПа соответственно). Сравнение с данными таблицы показывает, что  $p_{sh} > p_{cr}$ , т. е. эти боевики в контакте будут надежно иницировать детонацию зарядов баллистического пороха в скважинах диаметром  $\geq 40$  мм.

Отметим еще одно обстоятельство. При контактном взрыве тротилловой шашки Т-400 в порох входит ударная волна с давлением  $16,0$  ГПа, а при наличии медной преграды толщиной  $5$  мм между зарядами тротила и пороха — с давлением всего лишь  $7,5$  ГПа (см. рис. 3), т. е. преграда значительно снижает величину иницирующего импульса. Это надо учитывать в случае разрыва сплошности скважинного заряда. Влияние оболочки (стенок

тары) на передачу детонации между пороховыми зарядами было обнаружено нами при изучении возможности использования затаренного пороха НДТ-2 для производства взрывных работ (строительство каналов, коллекторов и т. п.). Заряд пороха в заводской упаковке представляет собой цинковый ящик, помещенный в деревянный ящик и содержащий  $72$  кг трубчатого пороха НДТ-2 (трубки диаметром  $5$  мм и длиной  $180 \div 500$  мм). Предполагалось устанавливать ящики впритык друг к другу в заранее подготовленной траншее (глубина  $3$  м, ширина порядка  $0,8$  м) и взрывать удлиненный заряд ( $10 \div 15$  и более ящиков) с одного или обоих концов. Однако предварительные опыты показали, что в таких зарядах детонация будет затухать и будут отказы. Проведено четыре серии опытов. Взрывали один ящик, затем два, потом три и четыре. Один ящик вскрывали, свободное пространство в металлическом ящике над порохом, упакованном в виде пчелиных сот, засыпали порошком гексогена массой  $20 \div 22$  кг, в него помещали две тротилловые шашки Т-400, снаряженные электродетонаторами, отверстие закрывали, ящик ставили на бок и подрывали. В случае одного и двух ящиков пороха (второй ящик ставился боковой гранью вплотную к дну первого ящика) наблюдалась полная детонация пороха, остатков его не было обнаружено. В случае трех ящиков находили остатки несгоревших пороховых элементов, а в случае четырех ящиков последний просто разрушался и порох разбрасывался по поверхности грунта.

С точки зрения вышеизложенного и с учетом результатов работы [4] можно дать следующее объяснение полученным результатам. Первый заряд пороха полностью детонировал, поскольку на порох воздействовал мощный иницирующий импульс от контактного взрыва заряда гексогена. Детонационная волна, натываясь на преграду (металл — дерево), генерирует ударную волну во второй заряд. Она иницирует сильный взрывной процесс во втором заряде, который может либо затухнуть, либо перейти в детонацию с низкой скоростью вблизи границы с третьим зарядом. На третий заряд воздействует менее мощный импульс (уже не детонационный), чем импульс, действовавший на второй заряд (в первом ящике взрывалось более  $90$  кг ВВ, а во втором —  $72$  кг). Этот импульс, проходя через очередную преграду (стенки тары), ослабляется, и на третий заряд воздействует ударная волна мень-

шей интенсивности, чем на второй. В третьем заряде возникает либо детонация с низкой скоростью, либо слабый взрывной процесс, аналогичный наблюдавшемуся в работе [4]. В обоих процессах элементы пороха, примыкающие к стенке ящика на границе с четвертым зарядом, не успевают сгорать в зоне реакции и разбрасываются при расширении продуктов взрыва в окружающую среду (элементы пороха у границы со вторым зарядом догорают в продуктах взрыва). Затухающий режим или детонация с низкой скоростью генерируют в четвертый заряд слабую ударную волну, которая не способна вызвать в порохе взрывной реакции, порох разбрасывается.

Результаты проведенных исследований показали, что чувствительность к ударной волне исследованных баллиститных порохов в сплошном состоянии заметно ниже, чем у прессованных бризантных ВВ, для которых  $p_{cr} = 0,5 \div 3,0$  ГПа [1], но близка к чувствительности жидких ВВ. При диаметре заряда  $d < 40$  мм для порохов  $p_{cr} = 6,0 \div 9,0$  ГПа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М. Критические давления инициирования взрывчатых веществ // Взрывное дело. № 68/25. М.: Недра, 1970. С. 68–92.
2. Хасаинов Б. А., Аттетков А. В., Борисов А. А. Ударноволновое инициирование пористых энергетических материалов и вязкопластическая модель горячих точек // Хим. физика. 1996. Т. 15, № 7. С. 53–123.
3. Афанасенков А. Н., Воскобойников И. М. Чувствительность баллиститного пороха при инициировании ударной волной // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 2. С. 331–332.
4. Кобылкин И. Ф., Носенко Н. И., Соловьев В. С. Детонационная способность и динамическое уплотнение крупнозернистой нитроклетчатки // Проблемы горения и взрыва: Материалы IX Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву, ноябрь 1989, Суздаль. Черноголовка, 1989. С. 93–97.
5. Конверсия. 1993. № 10, 11. (Материалы Первой международной конференции по конверсии боеприпасов.)
6. Смирнов Л. А., Тиньков О. В. Конверсионные промышленные ВВ — оптимальное направление утилизации устаревших порохов и ВВ // Конверсия. 1997. № 7. С. 8–11.
7. Физика взрыва / Ф. Л. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, Р. П. Челышев, Б. И. Шехтер / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
8. Апин А. Я., Стесик Л. Н., Шведова Н. С. Ударная адиабата баллиститного пороха // Докл. АН СССР. 1961. Т. 137, № 4. С. 908–909.
9. Веретенников В. А., Дремин А. Н., Шведов К. К. Ударная сжимаемость пороха НВ в сплошном и пористом состоянии // Физика горения и взрыва. 1969. Т. 5, № 4. С. 499–505.
10. Дремин А. Н., Розанов О. К., Савров С. Д., Якушев В. В. Ударное инициирование детонации в нитроглицерине // Физика горения и взрыва. 1967. Т. 3, № 1. С. 11–18.
11. Денисюк А. П., Демидова Л. А., Шепелев Ю. Г. и др. Высокоэффективные малотоксичные катализаторы горения баллиститных порохов // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 6. С. 72–79.
12. Афанасенков А. Н., Даниленко В. А. Иницирование детонации смесей гексогена с жидкими наполнителями ударными волнами // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 6. С. 915–922.
13. Апин А. Я., Костин И. Д., Стесик Л. Н. Детонация баллиститных порохов // Докл. АН СССР. 1961. Т. 137, № 9. С. 652–653.
14. Стесик Л. Н., Акимова Л. Н., Апин А. Я. Определение ширины зоны реакции и параметров детонации сплошного ВВ // Докл. АН СССР. 1961. Т. 137, № 2. С. 369–371.
15. Безопасность взрывных работ в промышленности / Под ред. Б. Н. Кутузова. М.: Недра, 1992.

Поступила в редакцию 19/VII 1999 г.