

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ДЕТОНАЦИИ МЕЖДУ ПАТРОНАМИ ВВ В РАССРЕДОТОЧЕННОМ ЗАРЯДЕ

С.А. Калякин, К.Н. Лабинский  
ДонНТУ, 83000, г. Донецк, ул. Атрема, д. 58  
[yglenit@gmail.com](mailto:yglenit@gmail.com), [bootor@gmail.com](mailto:bootor@gmail.com)

В статье исследован механизм передачи детонации между патронами ВВ в рассредоточенном заряде, и разработаны конструкции монозарядов и зарядов, состоящих из отдельных патронов ВВ, устойчиво детонирующих при замедленном взрывании.

**Введение.** Экспериментальные и теоретические исследования передачи детонации между патронами взрывчатого вещества (ВВ) имеют важное значение, так как их результаты дают данные для обоснования параметров устойчивости детонации составных шпуровых (скважинных) зарядов и выбора соответствующей конструкции заряда. Это позволяет снизить число неполных детонаций шпуровых (скважинных) зарядов и тем самым повысить эффективность и безопасность взрывных работ.

**Анализ последних исследований и публикаций**, посвященных этому вопросу, показал, что механизм передачи энергии взрыва активного заряда ВВ пассивному может осуществляться тремя путями: ударной волной, распространяющейся в среде, разделяющей заряды; газодинамическим потоком продуктов детонации ВВ; твердыми быстро летящими частицами, метаемыми взрывом. Однако, передача детонации между патронами определяется не только тем или иным механизмом передачи энергии взрыва, но и многообразием условий взрывания зарядов ВВ. В работах [1,2] показано, что основными причинами нарушения передачи детонации между патронами ВВ в шпуровых зарядах и возникновению их полных детонаций являются переуплотнение ВВ и снижение его детонационной способности (канальный эффект и динамическое прессование ВВ при откольных явлениях в шпурах) и раздвижка патронов в заряде с образованием между ними инертной среды при замедленном взрывании. Комплексная оценка устойчивости детонации шпурового заряда, учитывающая механизм передачи детонации между патронами, до конца не определена и требует решения.

**Целью настоящей работы** являются экспериментальные и теоретические исследования передачи детонации между рассредоточенными в заряде патронами ВВ для разработки конструкции шпурового заряда, устойчиво детонирующего в условиях замедленного взрывания.

Опытами и экспериментами было установлено [3], что передача детонации и ее возбуждение в пассивном заряде ВВ происходит в зоне, где параметры ударной волны и потока продуктов детонации от активного заряда настолько велики, что давление во фронте волны отражения удовлетворяет неравенству  $\Delta P \geq 3 * 10^7$  Па. Если к пассивному заряду подходит ударная волна с меньши-

ми параметрами в ее фронте, то возбуждению детонации всегда предшествует период горения ВВ.

Определение начальных параметров ударных волн в газообразной среде при передаче детонации от одного заряда ВВ к другому представляет собой достаточно сложную задачу. В работах [3,4] Л.Д. Ландау, К.П. Станюковича и Ф.А. Баума дается решение, которое позволяет определять параметры ударной волны вблизи поверхности заряда ВВ в зависимости от давления детонации ВВ –  $P_H$ , скорости его детонации –  $D$  и скорости истечения продуктов детонации в воздух  $W_D$ . Тогда отношение давления во фронте ударной волны  $P_x$  к давлению детонации ВВ на границе раздела «ВВ – газообразная среда» можно определить по формуле:

$$\frac{P_x}{P_H} = \frac{\rho_B(\gamma_a+1)(n+1)}{2\rho_{ВВ}} \left(\frac{W_D}{D}\right)^2 \quad (1)$$

где  $\rho_B, \rho_{ВВ}$  – плотность воздуха и ВВ соответственно;

$n$  – показатель политропы продуктов детонации ВВ;

$\gamma_a$  – показатель адиабаты воздуха с учетом его ионизации,  $\gamma_a \approx 1,2$ .

В работе [2] римановское решение доводится до конца, рассматривая отдельно обе части уравнения, описывающего расширение продуктов детонации и взрыва ВВ, и связывая решения в точке их сопряжения. Таким образом, имеем решение, позволяющее оценить в характерном для этого случая интервале расширения скорость истечения продуктов детонации ВВ в газообразную среду:

$$\frac{3n-1}{n^2-1} D \leq W_D \leq \frac{3n-1}{n^2-1} D + \frac{2C_k}{k-1} \quad (2)$$

где  $C_k$  – скорость звука в точке сопряжения продуктов взрыва и продуктов детонации (ПД) ВВ;

$k$  – показатель адиабаты продуктов взрыва ВВ.

Уравнение (2) позволяет приблизительно определить значение скорости истечения продуктов детонации ВВ в этом интервале. Тогда среднее значение скорости истечения можно найти из уравнения:

$$W_{D_{cp}} = \frac{3n-1}{n^2-1} D + \frac{2C_k}{k-1}, \text{ м/с.} \quad (3)$$

В соответствии с работой [2], значение скорости звука в продуктах взрыва ВВ равно:

$$C_k = \frac{D}{n+1} \left(\frac{P_k}{P_H}\right)^{\frac{n-1}{2n}}, \quad (4)$$

где  $P_k$  – давление продуктов взрыва ВВ в точке сопряжении ударных адиабат.

При подходе ударной волны к заряду, если поверхность его торца плоская и расположена нормально к направлению движения волны, происходит ее отражение, при этом давление резко возрастает:

$$\Delta P_{отр} = 2\Delta P_H + \frac{6\Delta P_H^2}{\Delta P_H + 7}, \quad (5)$$

а плотность воздуха в отраженной волне равна:

$$\rho_{отр} = \rho_B \frac{6P_{отр} + P_H}{P_{отр} + 6P_H}, \quad (6)$$

где  $\Delta P_{\Pi}$  и  $P_{\Pi}$  – избыточное давление и давление во фронте падающей волны соответственно;

$\Delta P_{\text{отр}}$  и  $P_{\text{отр}}$  – избыточное давление и давление во фронте отраженной волны;

$\rho_{\text{отр}}$  и  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха за фронтом падающей и отраженной волны.

Уравнения (5) и (6) получены для показателя адиабаты воздуха  $k_{\text{в}} \approx 1,4$ .

Скорость отраженной ударной волны  $U_{\text{отр}}$  находится по уравнению:

$$U_{\text{отр}} \frac{k_{\text{в}}+1}{2} \rho_{\text{отр}} = \Delta P_{\text{отр}} - \Delta P_{\Pi}. \quad (7)$$

Одновременно с отражением начинается движение волн разряжения от границ к центру торца заряда. Время действия давления в отраженной волне до установления режима обтекания равно:

$$\tau_{\text{отр}} = \frac{l}{c_{\text{р}}},$$

где  $l$  – поперечный размер поверхности заряда, на который действует ударная волна;

$c_{\text{р}}$  – скорость волны разряжения.

Для времени действия на пассивный заряд потока воздуха и продуктов взрыва активного заряда  $t > \tau_{\text{отр}}$  можно определить среднюю критическую скорость потока  $W_{\text{кр}}$ , необходимую для возбуждения детонации ВВ в пассивном заряде по теории Гарансона [5] через импедансы среды и вещества ВВ:

$$W_{\text{кр}} = \frac{D_{\text{ВВ}}(\rho_{\text{отр}}U_{\text{отр}} + \rho_{\text{ВВ}}D_{\text{ВВ}})}{2(\rho_{\text{отр}}U_{\text{отр}})}. \quad (8)$$

Полученные уравнения (1)-(8) позволяют моделировать условия передачи детонации между зарядами ВВ, задаваясь параметрами ударных волн в зазоре, образованных взрывом активного заряда и значением критической скорости детонации ВВ в пассивном заряде. Их критические величины  $W_{\text{кр}}$  и  $D$  можно установить из эксперимента по передаче детонации.

Экспериментальная часть работы включала измерение скорости детонации ВВ в активном и пассивном зарядах, а также скорости ударной волны и продуктов взрыва в воздушном зазоре, их разделяющем. Были проведены три серии экспериментов: для открытых зарядов, для зарядов в трубке и зарядов, соединенных между собой трубками. Схемы этих опытов показаны на рис 1.

Было установлено, что для активных и пассивных зарядов аммонита №6ЖВ с плотностью патронирования ВВ  $0,95..1,05$  г/см<sup>3</sup> и диаметром 24..32 мм передача детонации для открытых зарядов составила 4 см, отказы на 5 см, в трубе из ПВХ с толщиной стенки 1,7 мм передача детонации на 10 см, отказ на 12 см, и у открытых зарядов, соединенных стеклянными трубками диаметром 6..10 см передача детонации составила 10 см и отказ 12 см. Развитие процесса детонации ВВ в пассивном заряде изучали измеряя скорость детонации по длине патрона начиная от торца, обращенного к активному заряду. На рис. 2 показаны графики зависимостей изменения скорости ударных волн и потока продуктов детонации в воздушном зазоре между активными и пассивными зарядами ВВ. Их зависимости имеют следующий вид:

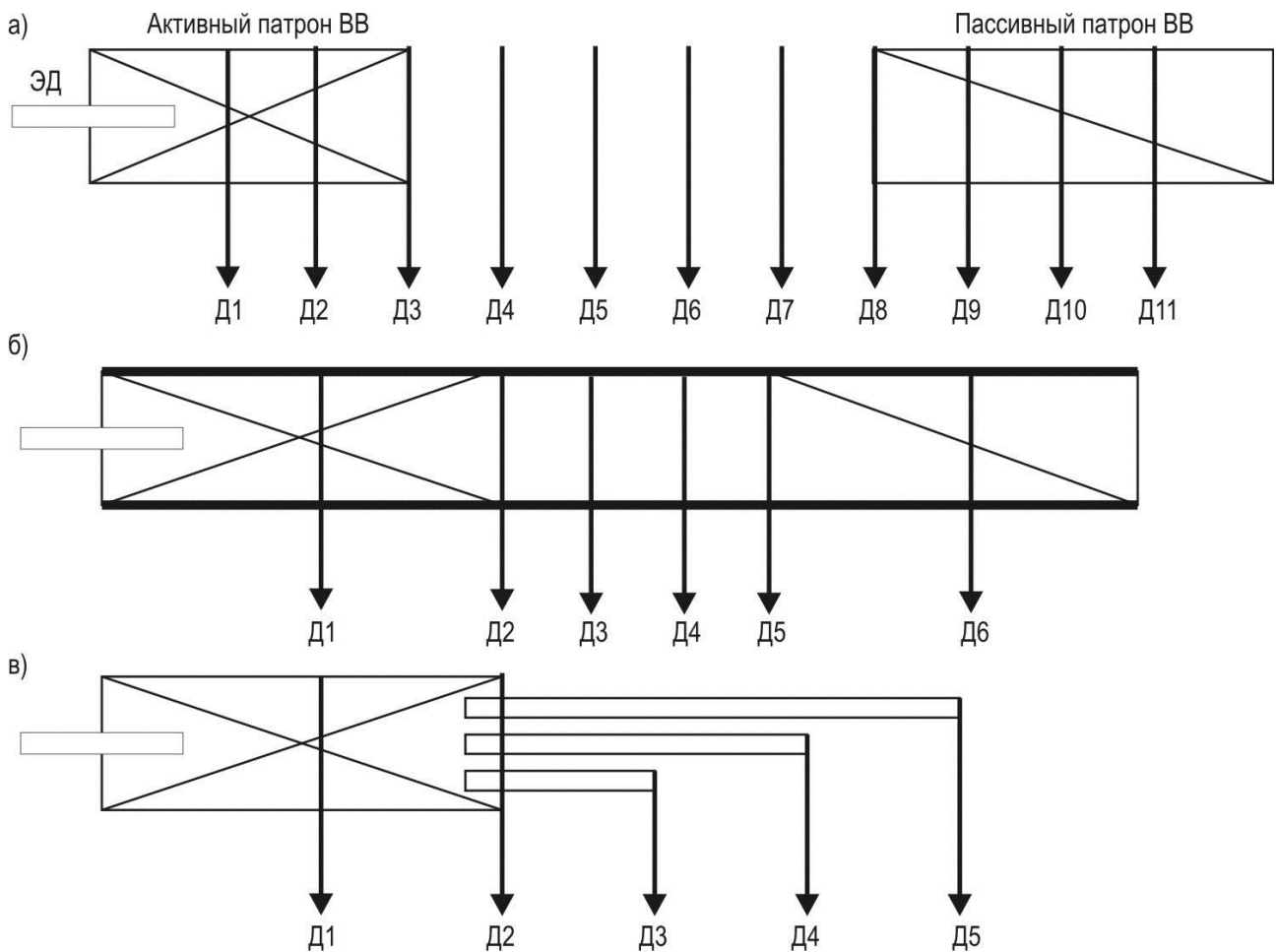


Рис. 1. Схемы проведения опытов

*а – открытые заряды; б – заряды в оболочке из ПХВ; в – измерение скорости распространения ударной волны и продуктов детонации в стеклянных трубках*

для открытых зарядов:

$$W = \frac{4120.4015 - 369.03907 * l}{1 - 0.14824379 * l + 0.010375567 * l^2};$$

для зарядов в трубе из ПХВ:

$$W = \frac{4145.2108 + 1841.9016 * l}{1 + 0.21769434 * l + 0.017003393 * l^2};$$

для зарядов, соединенных стеклянными трубками с диаметром

10,1 мм:

$$W = \frac{4155.9452 + 2760.2969 * l}{1 + 0.37851223 * l + 0.011970419 * l^2};$$

7,2 мм:

$$W = \frac{4140.9273 + 4809.9651 * l}{1 + 0.61135783 * l + 0.009590224 * l^2};$$

6,0 мм:

$$W = \frac{4118.1254 + 7500.596 * l}{1 + 0.89264096 * l + 0.0079279099 * l^2};$$

(9)

Данные по скорости детонации ВВ в пассивном патроне при передаче детонации приведены в табл. 1.

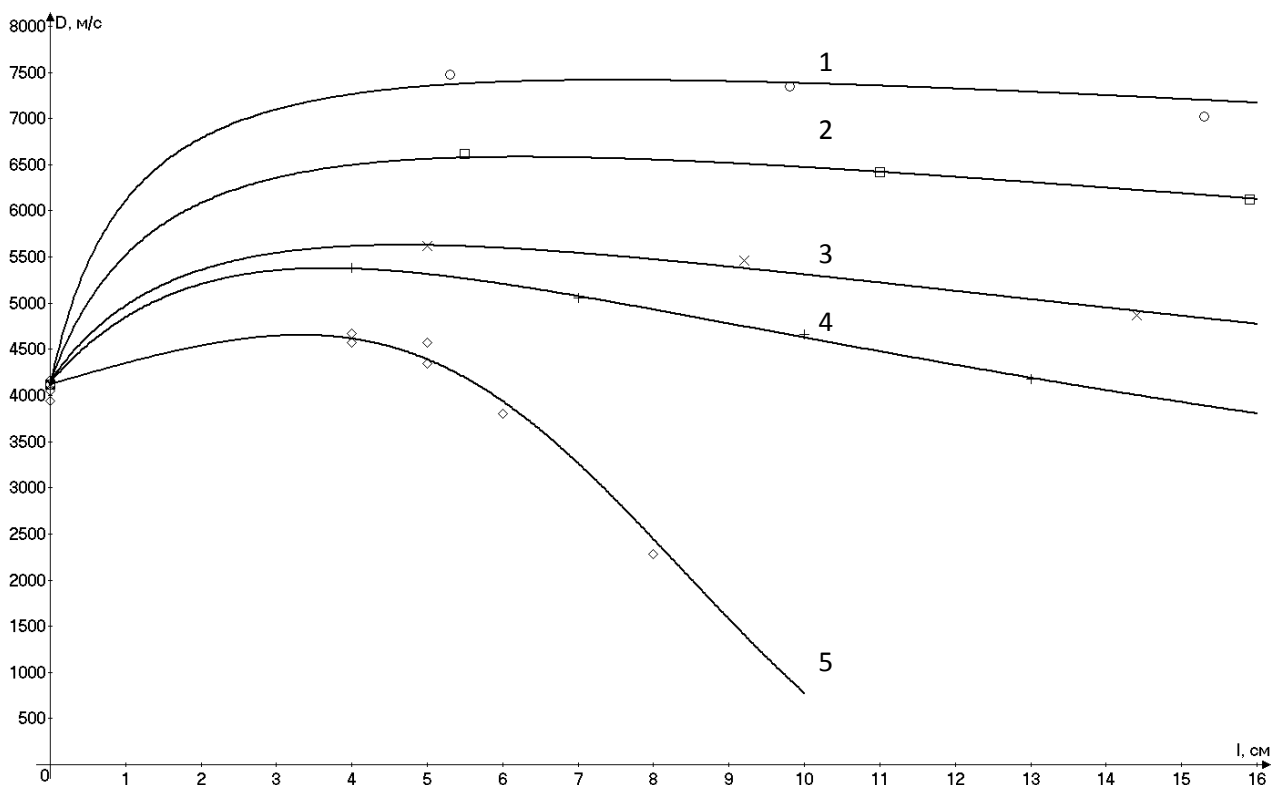


Рис. 2. Графики зависимостей изменения скорости ударных волн и потока продуктов детонации в воздушном зазоре между активными и пассивными зарядами ВВ и результаты лабораторных исследований

1 – в стеклянной трубке диаметром 6,0 мм; 2 – в стеклянной трубке диаметром 7,2 мм; 3 – в стеклянной трубке диаметром 10,1 мм; 4 – в трубе из ПВХ; 5 – в воздухе.

Табл. 1. Скорость детонации ВВ по длине пассивного заряда начиная с торца патрона

№	Воздушный зазор, см	Скорость УВ в зазоре	Скорость детонации ВВ, м/с по длине заряда, мм			
			0-15	15-30	30-45	45-60
1	3,6	4690,2	3027	3582,1	3809,5	3809,5
2	4,0	4671,5	2474,2	3030,1	3231,7	3871
3	4,0	4961,2	1395,3	3157,9	3809,5	3809,5
4	5,0	4571,4	509,6	-	-	-

Таким образом, исследования позволили установить расстояния передачи детонации через воздушный зазор между зарядами аммонита №6ЖВ. Зная расстояние передачи детонации между зарядами, можно определить значение скорости газодинамического потока и ударной волны в зазоре  $W$  по зависимости (9). Так, если принять в качестве критического расстояния передачи детонации между открытыми зарядами  $l_{кр}=4,5$  см, то критическая скорость истечения продуктов детонации и ударной волны в зазоре составит  $W_{кр} \approx 4530$  м/с. Исследования скорости детонации аммонита №6ЖВ позволяют установить параметры падающей ударной волны на торце пассивного заряда по уравнению (1):

$$\frac{\Delta P_{\Pi}}{P_x} = \left(\frac{W_{кр}}{W_x}\right)^2; \Delta P = 9,0544 * 10^7 \left(\frac{4530}{8197,2}\right)^2 \approx 2,8 * 10^7 \text{ Па.}$$

где  $P_x$  и  $W_x$  – начальное давление и скорость истечения продуктов детонации ВВ.

При таком давлении газ за фронтом ударной волны ионизирован, поэтому для него принимаем  $k_g=1,2$ . Тогда максимальная степень сжатия газа при отраженной ударной волне от торца патрона составит:

$$\frac{P_{отр}}{\Delta P_{\Pi}} = \frac{3k_B-1}{k_B-1} \approx 13,$$

а давление в отраженной волне:

$$P_{отр} = 13 * 2,8 * 10^7 = 3,64 * 10^8 \text{ Па.}$$

Плотность воздуха за ударной волной составит:

$$\rho_B \approx 1,224 * \frac{2,8*10^7*1,2+1,02*10^5*0,2}{2,8*10^7*0,2+1,02*10^5*1,2} \approx 7,2 \text{ кг/м}^3;$$

а в отраженной:

$$\rho_{отр} \approx 7,2 * \frac{3,64*10^8*1,2+2,8*10^7*0,2}{3,64*10^8*0,2+2,8*10^7*1,2} \approx 30,0 \text{ кг/м}^3.$$

Скорость отраженной ударной волны:

$$U_{отр} = \left[ \frac{2(P_{отр} - \Delta P_{\Pi})}{\rho_B(k+1)} \right]^{0.5} \approx 6513,4 \text{ м/с.}$$

Согласно уравнения (8), найдем критическую скорость детонационной волны ВВ в пассивном заряде, решая квадратное уравнение:

$$D_{кр}^2 \rho_{ВВ} + \rho_{отр} U_{отр} D_{кр} - 2 \rho_{отр} U_{отр} W_{кр} = 0.$$

Для  $\rho_{ВВ} = 950 \text{ кг/м}^3$  и  $W_{кр} = 4530 \text{ м/с}$  получим критическую скорость детонации ВВ, равную  $D_{кр} = 1270 \text{ м/с}$ .

Прямые измерения скорости детонационной волны в торце пассивного заряда ВВ дают значение  $D=1330 \text{ м/с}$ , что указывает на достаточно хорошее совпадение результатов аналитических расчетов и эксперимента.

Таким образом, удалось обосновать параметры передачи детонации через воздух между зарядами ВВ. Это позволяет выбрать конструкцию заряда ВВ, устойчиво детонирующего в условиях замедленного взрывания.

**Выводы.** Проведены аналитические исследования передачи детонации между патронами ВВ на воздухе. Установлены основные факторы, определяющие параметры передачи детонации между открытыми зарядами ВВ. Экспериментальные исследования передачи детонации между патронами ВВ на воздухе и в трубе позволили установить критические значения скорости газодинамического потока продуктов взрыва ВВ и ударной волны в промежутке между активным и пассивным зарядами ВВ, а также критическую скорость возбуждения детонации в пассивном патроне аммонита №6ЖВ. Проведенные исследования позволили обосновать конструкцию шпурового заряда, устойчиво детонирующего в условиях замедленного взрывания.

#### Перечень ссылок.

1. Шевцов Н.Р. Исследование процесса раздвижки патронов в шпурах при взрывных работах в вертикальных шахтных стволах // Наукові

- праці ДонНТУ: Серія гірничо-геологічна. Вип. 45 / Н.Р. Шевцов, И.В. Купенко, К.Н. Лабинский и др.– Донецк: ДонНТУ, 2002.– с. 118-123.
2. Шевцов Н.Р. Исследование полноты и устойчивости детонации зарядов с инертными промежутками между патронами ВВ // Разработка рудных месторождений. Вып. №1 (90) / Н.Р. Шевцов, С.А. Калякин, О.И. Рублева.– Кривой Рог: КТУ, 2006.– с. 75-79.
  3. Баум Ф.А. Физика взрыва / Ф.А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер.– М.: Физматгиз, 1959.–799 с.
  4. Ландау Л.Д. Определение скорости истечения продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ // Сб.тр. Л.Д. Ландау. Т1 / Ландау Л.Д., Станюкович К.П.– М.: наука, 1969.– С. 499-503.
  5. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах / кук М.А.– М.: Недра, 1980.– 452 с.