

МЕХАНИЗМ ПЕРЕДАЧИ ДЕТОНАЦИИ МЕЖДУ ПАТРОНАМИ В ШПУРОВОМ ЗАРЯДЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

С. А. Калякин

Донецкий национальный технический университет
ул. Артема, 58, г. Донецк, 83000, Украина. E-mail: yglenit@gmail.com

Исследован механизм передачи детонации между патронами взрывчатых веществ в шпуровом заряде, и разработаны конструкции монозарядов и зарядов, состоящих из отдельных патронов взрывчатых веществ, устойчиво детонирующих в шпурах при замедленном взрывании. Измерены скорости детонации взрывчатых веществ в активном и пассивном зарядах, а также скорости ударной волны и продуктов взрыва в воздушном зазоре, разделяющем заряды.

Ключевые слова: детонация, заряд, передача детонации, ударная волна, скорость продуктов взрыва, давление во фронте ударной волны.

МЕХАНІЗМ ПЕРЕДАЧІ ДЕТОНАЦІЇ МІЖ ПАТРОНАМИ У ШПУРОВОМУ ЗАРЯДІ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН

С. О. Калякін

Донецький національний технічний університет
вул. Артема, 58, м. Донецьк, 83000, Україна. E-mail: yglenit@gmail.com

Досліджений механізм передачі детонації між патронами вибухових речовин у шпуровому заряді, та розроблені конструкції моно зарядів і зарядів, що складаються з окремих патронів вибухових речовин, стійко детонуючи при уповільненому підриванні. Виміряні швидкості детонації вибухових речовин в активному та пасивному зарядах, а також швидкості ударної хвилі та продуктів вибуху у повітряному зазорі, що розділяє заряди.

Ключові слова: детонація, заряд, передача детонації, ударна хвиля, швидкість продуктів вибуху, тиск во фронті ударної хвилі.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Экспериментальные и теоретические исследования передачи детонации между патронами взрывчатого вещества (ВВ) имеют большое значение, т.к. позволяют разработать конструкцию шпурового заряда которая обеспечивает снижение числа неполных детонаций шпуровых зарядов и тем самым повысит 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 и твердыми быстро летящими частицами, метаемыми взрывом. Однако передача детонации между патронами определяется не только тем или иным механизмом передачи энергии взрыва ВВ, но и многообразием условий взрывания зарядов. В работах [1, 2] показано, что основными причинами нарушения передачи детонации между патронами ВВ в шпуровых зарядах являются переуплотнение ВВ и раздвижка патронов в заряде с образованием между патронами ВВ инертной среды. Механизм передачи детонации между патронами при таких условиях взрывания ВВ, пока не достаточно изучен, и требует всестороннего исследования.

Целью настоящей работы является исследование механизма передачи детонации между патронами ВВ в шпуровом заряде для обоснования конструкции шпурового заряда, при которой ВВ будет устойчиво детонировать в шпурах при короткозамедленном взрывании.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Ранее было установлено [3], что передача дето-

нации и возбуждение ее 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: $\Delta P \geq 3 \cdot 10^7$ Па, в противном случае возбуждению детонации в пассивном патроне 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 Л.Д. Ландау, К.П. Станюковича и Ф.А. Баума [3, 4] дается решение, которое позволяет определять параметры ударной волны вблизи поверхности заряда ВВ в зависимости от давления детонации ВВ – P_n , скорости его детонации – $D_{ВВ}$ 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:

$$\frac{P_x}{P_n} = \frac{r_g (k_g + 1)(n + 1) \left(\frac{W_D}{D_{ВВ}} \right)^2}{2r_{ВВ}}, \quad (1)$$

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

n – показатель политропы продуктов детонации ВВ;

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

В работе [2] римановское решение уравнения 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 реше-

ние, позволяющее оценить в характерном для этого случая интервале расширения скорость истечения продуктов детонации ВВ в газообразную среду:

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

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 активного заряда. Тогда среднее значение скорости истечения продуктов взрыва в промежуток можно найти из уравнения:

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

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

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

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

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

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

а плотность воздуха в отраженной волне равна:

$$r_{omp} = r_e \frac{6P_{omp} + P_n}{P_{omp} + 6P_n}, \quad (6)$$

где ΔP_n и P_n – избыточное давление и давление во фронте падающей волны соответственно;

ΔP_{omp} и P_{omp} – избыточное давление, и давление во фронте отраженной волны соответственно;

ρ_n и ρ_{omp} – плотность воздуха за фронтом падающей и отраженной волны.

Уравнения (5) и (6) получены для показателя адиабаты воздуха $k_e = 1,4$.

Скорость отраженной ударной волны – U_{omp} находится из уравнения:

$$U_{omp}^2 \frac{k_e + 1}{2} r_{omp} = \Delta P_{omp} - \Delta P_n. \quad (7)$$

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

$$t_{omp} = \frac{l}{C_p},$$

где l – поперечный размер поверхности пассивного заряда, на который действует ударная волна; C_p – скорость волны разряжения.

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

$$W_{kp} = \frac{D_{BB}(r_{omp}U_{omp} + r_{BB}U_{BB})}{2r_{omp}U_{omp}}. \quad (8)$$

Полученные уравнения (1)–(8) позволяют моделировать условия передачи детонации между зарядами ВВ, задавая параметрами ударных волн в зазоре, образованных взрывом активного заряда, и значением критической скорости детонации ВВ в пассивном заряде. Их критические величины можно установить только из эксперимента по передаче детонации между патронами ВВ. Экспериментальная часть работы включала измерение скорости детонации ВВ в активном и пассивном зарядах, а также скорости ударной волны и продуктов взрыва в воздушном зазоре, разделяющем заряды. Схемы этих опытов показаны на рис 1.

Исследованиями установили, что для активных и пассивных зарядов аммонита № 6ЖВ с плотностью патронирования ВВ 0,95..1,05 г/см³ и диаметром 24..32 мм передача детонации для открытых зарядов на воздухе составила 4 см, а на расстоянии 5 см происходили отказы. В трубе из ПХВ с толщиной стенки 1,7 мм расстояние передачи детонации между зарядами ВВ составляло 10 см, а на 12 см происходили отказы. У открытых зарядов, соединенных стеклянными трубками диаметром 6..10 мм, передача детонации составила 10 см, а отказ на 12 см. Развитие процесса детонации ВВ в пассивном заряде контролировали, измеряя скорость детонации по длине патрона, начиная от торца, обращенного к активному заряду. На рис. 2 показаны графики зависимости скорости ударных волн и потока продуктов детонации ВВ в воздушном зазоре в зависимости от расстояния между активными и пассивными зарядами. Эти зависимости имеют следующий вид:

– для открытых зарядов:

$$W_{D1} = \frac{4120,4015 - 369,03907 \cdot l}{1 - 0,1482879 \cdot l + 0,010375567 \cdot l^2};$$

– для зарядов в трубе из ПХВ:

$$W_{D2} = \frac{4145,2108 + 1841,9016 \cdot l}{1 + 0,21769484 \cdot l + 0,017003393 \cdot l^2};$$

– для зарядов, соединенных стеклянными трубками с диаметром
а) 10,1 мм:

$$W_{D3} = \frac{4155,9452 + 2760,2969 \cdot l}{1 + 0,87851228 \cdot l + 0,011970419 \cdot l^2};$$

б) 7,2 мм:

$$W_{D4} = \frac{4140,9273 + 4809,9651 \cdot l}{1 + 0,61135783 \cdot l + 0,009590224 \cdot l^2}$$

в) 6,0 мм:

$$W_{D5} = \frac{4118,1254 + 7500,596 \cdot l}{1 + 0,89264096 \cdot l + 0,0079279099 \cdot l^2}$$

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

Таким образом, исследования позволили установить расстояние передачи детонации через воздушный зазор между зарядами аммонита № 6ЖВ, а также критические значения скорости детонации ВВ в пассивном патроне и скорости ударной волны в зазоре.

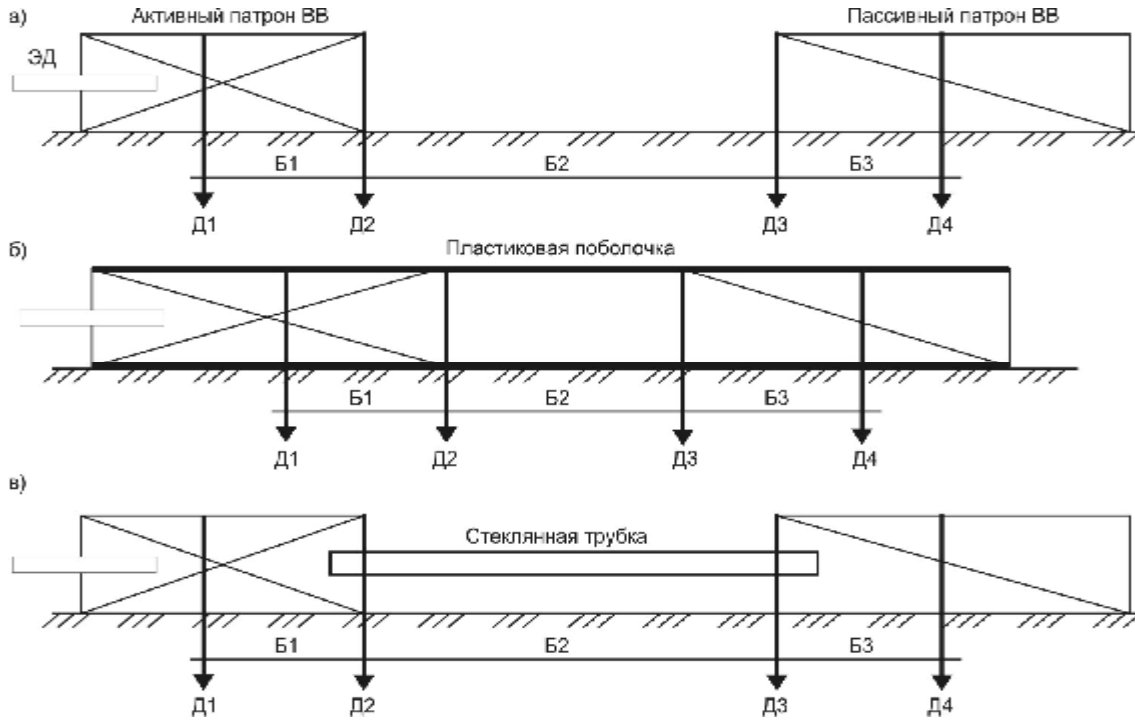


Рисунок 1 – Схемы измерения скорости ударной волны и расширения продуктов детонации для а) открытых зарядов, б) зарядов в трубе из ПВХ, в) зарядов, соединенных полыми стеклянными трубками

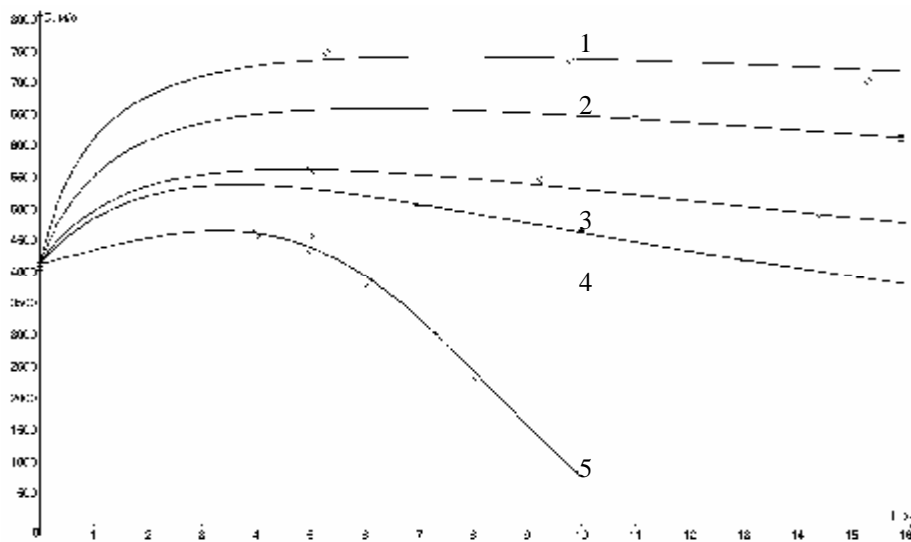


Рисунок 2 – Графики зависимости скорости ударных волн и потока продуктов детонации ВВ в воздушном зазоре от расстояния между активными и пассивными зарядами: 1 – в стеклянной трубке диаметром 6,0 мм; 2 – в стеклянной трубке диаметром 7,2 мм; 3 – в стеклянной трубке диаметром 10,1 мм; 4 – в трубе из ПВХ; 5 – открытыми зарядами

Таблиця 1 – Скорость детонации взрывчатых веществ, измеряемая по длине пассивного заряда, начиная с торца патрона

Воздуш- ный зазор, см	W_D в зазоре, м/с	Скорость детонации ВВ, м/с			
		по длине заряда 0–15 мм	по длине заряда 15–30 мм	по длине заряда 30–45 мм	по длине заряда 45–60 мм
3,6	4690,2	3027	3582,1	3809,5	3809,5
4,0	4671,5	2474,2	3030,1	3231,7	3871
4,0	4961,2	1395,3	3157,9	3809,5	3809,5
5,0	4571,4	509,6	–	–	–

Зная расстояние передачи детонации между рядами, можно аналитически определить значение скорости газодинамического потока и ударной волны в зазоре по зависимости (9). Принимаем $l_{кр} \approx 4,5$ см за критическое расстояние передачи детонации между открытыми зарядами. Тогда критическая скорость ударной волны равна $W_{кр} \approx 4530$ м/с. Исследования скорости детонации аммонита № 6ЖВ и начальных параметров ударных волн на границе раздела «ВВ-воздух» позволяют установить параметры «падающей» на торец пассивного заряда ударной волны по уравнению:

$$\frac{\Delta P_n}{P_x} = \left(\frac{W_{кр}}{W_x} \right)^2;$$

$$\Delta P = 9,0544 \cdot 10^7 \left(\frac{4530}{8197,2} \right)^2 \approx 2,8 \cdot 10^7 \text{ Па,}$$

где P_x и W_x – начальное давление во фронте воздушной ударной волны и начальная скорость истечения продуктов детонации аммонита.

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

$$\frac{P_{omp}}{\Delta P_n} = \frac{3k_g}{k_g - 1} \approx 13,$$

а давление в отраженной волне будет равно:

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

Плотность воздуха за ударной волной составит:

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

а в отраженной волне будет равна:

$$r_{omp} \approx 7,2 \frac{3,64 \cdot 10^8 \cdot 1,2 + 2,8 \cdot 10^7 \cdot 0,2}{3,64 \cdot 10^8 \cdot 0,2 + 2,8 \cdot 10^7 \cdot 1,2} \approx 30,0 \text{ кг/м}^3.$$

Находим скорость отраженной ударной волны:

$$U_{omp} = \left[\frac{2(P_{omp} + \Delta P_n)}{r_n(k+1)} \right]^{0,5} \approx 6513,4 \text{ м/с.}$$

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

$$D_{кр}^2 r_{ВВ} + r_{omp} U_{omp} D_{кр} - 2 r_{omp} U_{omp} W_{кр} = 0$$

Для $\rho_{ВВ}=950$ кг/м³ и $W_{кр}=4530$ м/с $D_{кр}=1270$ м/с.

Прямые измерения скорости детонационной волны по длине пассивного заряда ВВ 0-15 мм дают минимальное значение $D_{кр} = 1330$ м/с, что указывает на достаточно хорошее совпадение результатов аналитических расчетов и эксперимента.

Таким образом предложенный механизм передачи детонации между патронами ВВ позволил установить критические параметры ударных волн при которых происходит передача детонации между открытыми зарядами ВВ на воздухе. Это позволяет выбрать конструкцию шпурового заряда ВВ, устойчиво детонирующего в условиях раздвижки патронов в зависимости от параметров «падающих» ударных волн и критической скорости детонации ВВ.

ВЫВОДЫ. Экспериментальные исследования позволили установить механизм передачи детонации между патронами ВВ и критические значения скоростей газодинамического потока продуктов взрыва активного заряда ВВ, ударной волны в воздушном зазоре между активными и пассивными зарядами и критическую скорость детонации аммонита № 6ЖВ в пассивном патроне при которых происходит передача детонации между патронами. Проведенные исследования позволили обосновать конструкцию шпурового заряда, устойчиво детонирующего в условиях замедленного взрывания при раздвижке патронов в шпурах.

ЛИТЕРАТУРА

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

**THE MECHANISM OF SYMPATHETIC DETONATION BETWEEN THE CARTRIDGES
IN AN EXPLOSIVE BLAST-HOLE CHARGE**

S. Kalyakin

Donetsk State Technical University

vul. Artyoma, 58, Donetsk, 83000, Ukraine. E-mail: yglenit@gmail.com

The mechanism of sympathetic detonation between the explosive cartridges within a blast-hole charge is analyzed in this article. The developed designs of mono-charges and compound blasting charges, which detonate permanently in blast-holes while delayed blasting, are presented in this article. The detonation velocities for explosives in initial and inert charges as well as shock wave velocity and stytthe velocity in the air gap intersecting the charges were calculated.

Key words: detonation, charge, sympathetic detonation, shock wave, stytthe velocity, shock wave front pressure.

REFERENCES

1. Shevtsov N.R. Researching of process or separation of the charges in blast-holes during explosive works in / N.R. Shevtsov, I.V. Kuppenko, K.N. Labinskiy and others // *Science works of DonSTU: Mine-geological series*. Iss. 45. – Donetsk: DonSTU, 2002. – PP. 118–123. [in Russian]

2. Shevtsov N.R. Researching of completeness and stability of detonation of charges with inert gaps between blast-hole charge cartridges / N.R. Shevtsov, S.A. Kalyakin, O.I. Rubleva // *Development of ore deposits*. Iss. № 1 (90). – Krivoy Rog: KTU, 2006. – PP. 75–79. [in Russian]

3. *Physics of explosion* / F.A. Baum, K.P. Stanukovich, B.I. Shekhter. – M.: Fizmatgiz, 1959. – 799 p. [in Russian]

4. Landau L.D. Determination of speed of outflow of detonation products of condensed explosives // *Comp. of works. L.D. Landau. V.1* / Landau L.D., Stanukovich K.P. – M.: Science, 1969. – PP. 499–503. [in Russian]

5. Kuk M.A. *Science about industrial explosives*. – M.: Nedra, 1980. – 452 p. [in Russian]

Стаття надійшла 03.09.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Чебенком В.М.