

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НЕСТАЦИОНАРНО ДЕТОНИРУЮЩИХ ШПУРОВЫХ ЗАРЯДОВ ВВ

*К.Н. Лабинский, Донецкий национальный технический университет, Украина*

В работе приведены результаты по исследованию влияния процессов, протекающих при детонации составных шпуровых зарядов. Установлено предельное число стыков между патронами ВВ, приводящее с вероятностью 99% к отказам.

**Введение.** Подавляющее число промышленных ВВ являются аммиачно-селитренными смесями, основным компонентом которых является нитрат аммония. Нитрат аммония имеет слабо выраженные взрывчатые свойства и его смеси с индивидуальными ВВ или невзрывчатыми горючими компонентами являются кинетически неоднородными системами. В отличие от индивидуальных ВВ, при детонации промышленных ВВ химические реакции во фронте детонационной волны происходят в несколько стадий. Поэтому они имеют более низкую детонационную способность и устойчивость детонации. При ведении взрывных работ используются патронированные промышленные взрывчатые вещества, когда шпуровой заряд состоит из нескольких патронов. Передача детонации между патронами ВВ также влияет на устойчивость и полноту детонации шпурового заряда. В связи с чем необходимо обосновать как параметры устойчивости детонации ВВ, так и конструкцию шпуровых зарядов, обеспечивающую полноту их детонации в шпуре. Это позволит обеспечить безопасность и эффективность взрывных работ.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Как было установлено ранее проведенными исследованиями, особенности детонации промышленных ВВ связаны с растянутостью зоны химических реакций и большим чем у индивидуальных ВВ критическим диаметром детонации, зависящем от плотности ВВ. Для промышленных ВВ наблюдается характерный спад скорости детонации сразу после ее максимума при увеличении плотности заряда, отвечающего некоторой критической плотности ВВ. При увеличении плотности ВВ в заряде сверх критической спад скорости детонации может быть таким резким, что детонация становится неустойчивой и может привести к отказам.

В работах [1,2], показано, что основными причинами отказов и неполных детонаций шпуровых зарядов ВВ являются: снижение детонационной способности ВВ при его динамическом уплотнении, раздвижка патронов ВВ в шпуровом заряде, образование между отдельными патронами ВВ пересыпок из буровой мелочи, воды, угольного штыба и при проявлении канального эффекта в зазоре между зарядом и стенкой шпура.

Комплексная оценка устойчивости детонации шпурового заряда, учитывающая механизм передачи детонации между патронами и условия взрывания ВВ, пока не дана, и эта задача требует решения. Поэтому проблема обеспечения достаточной устойчивости детонации зарядов промышленных ВВ в шпурах имеет большое научное значение, так как определяет эффективность и безопасность их применения.

**Целью работы** является исследование устойчивости нестационарной детонации зарядов промышленных ВВ в шпурах с учетом аномальной зависимости их детонационных характеристик от плотности ВВ, диаметра, передачи детонации между патронами шпурового заряда и уплотнения ВВ в патроне опережающей ударной волной в зазоре между зарядом и стенкой шпура.

### **Материалы и результаты исследований.**

В результате исследований [3] удалось получить обобщенную зависимость неидеальной скорости детонации аммонита БЖВ в виде сложной функции:

$$D = 5865,63 \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр}} \right)^{0,513} \left\{ 1 - \exp \left[ -0,64345 \left( \frac{d_{ВВ}}{d_{кр}} \right) \right] \right\}, \text{ м/с,}$$

где  $\rho_{ВВ}$  и  $\rho_{кр}$  – соответственно плотность ВВ и плотность монокристалла, г/см<sup>3</sup>;

$d_{ВВ}$  и  $d_{кр}$  – соответственно диаметр заряда и критический диаметр ВВ, мм.

Кроме детонационных характеристик ВВ, на устойчивость детонации шпурового заряда влияет передача детонации между патронами.

Процесс передачи детонации через инертные промежутки детально рассмотрен в работе [2]. Было установлено влияние параметров инертных промежутков на пульсирующий характер детонации и показано, что наличие промежутков снижает скорость детонации в последующих зарядах ВВ.

Опытами и экспериментами в работе [4] было установлено, что передача детонации 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 всегда предшествует период горения ВВ.

В работе [4] для времени действия на пассивный заряд потока воздуха и продуктов взрыва активного заряда  $\tau > \tau_{кр}$  была установлена зависимость для определения средней критической скорости потока –  $W_{кр}$ , необходимой для возбуждения детонации ВВ в пассивном заряде аммонита бЖВ по теории Гарансона [4] через импедансы среды и вещества ВВ.

Полученные в работе [4] зависимости позволяют моделировать условия передачи детонации между зарядами ВВ, задаваясь параметрами ударных волн, образованных взрывом активного заряда, и значением критической скорости детонации ВВ в пассивном заряде. Их критические величины можно установить из эксперимента по передаче детонации между зарядами аммонита №бЖВ  $W_{кр} = 4530$  м/с и  $D_{кр} = 1270$  м/с.

Процессы, протекающие при взрыве шпурового заряда, можно представить в следующем виде (рис. 1).

В патроне-боевике детонационный фронт движется со скоростью  $D_1$ . Затем при передаче детонации между патронами через инертный промежуток наблюдается скачок скорости детонации, что приводит к изменению скорости детонации во втором патроне  $D_2$ . Параллельно процессу детонации в шпуровом заряде, в воздушном зазоре между зарядом ВВ и стенкой шпура движется ударная волна, опережая фронт детонации, что приводит к уплотнению заряда и уменьшению его эффективного сечения. Однако, как известно, скорость детонации падает с уменьшением заряда сильнее, чем имеет место ее возрастание от увеличения плотности ВВ. При отражении ударной волны от дна шпура на определенном расстоянии происходит ее встреча с детонационной волной, вызывающая скачок давления, приводящий к еще большему переуплотнению ВВ, что также может привести к затуханию детонации и отказу.

Если предположить, что основной причиной нарушения детонации заряда при канальном эффекте является давление газа создаваемое ударной волной в зазоре, то критическое условие для распространения детонации ВВ в заряде можно записать в виде безразмерного соотношения времени детонации заряда  $t_d$  к времени действия внешнего давления на ВВ, приводящего к его динамическому уплотнению  $t_y$ :

$$t_d / t_y \leq 1. \quad (1)$$

Тогда, если время детонации будет всегда меньше времени действия внешнего давления, детонация будет распространяться по заряду ВВ. В противном случае процесс детонации нарушается вследствие динамического уплотнения ВВ.

Время детонации определяется как сумма времени химической реакции  $t_{x.p.}$  и времени задержки инициирования детонации  $t_z$ . Согласно работы [5], время химической реакции можно определить, зная диаметр заряда, скорость детонации ВВ в заряде и идеальную скорость детонации ВВ:

$$t_{x.p.} = \left(\frac{5}{9}\right)^{0.5} \frac{d}{D} \left[1 - \left(\frac{d}{D_u}\right)^2\right]^{0.5}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр заряда;

$D, D_u$  – соответственно скорость детонации ВВ в заряде и идеальная скорость

детонации.

Время задержки инициирования детонации ВВ, в основном, наблюдается на стыках между патронами, и зависит от свойств ВВ и качества стыков. В работе [6] отмечается сильное влияние задержки инициирования детонации на стыках между патронами на детонацию заряда в целом. Природа задержки инициирования детонации связана с тем, что на стыке между патронами параметры ударной волны снижаются настолько, что возбуждение детонации в пассивном патроне происходит через промежуточную стадию горения и низкой скорости детонации ВВ. Поскольку известно [7], что реакция разложения ВВ при инициировании детонации протекает в форме адиабатического взрыва, то задержка теплового взрыва определяется параметрами ВВ и критической температурой сжатия ВВ ударной волной, ее можно определить по формуле:

$$t_z = \frac{C_v RT_{кр}^2}{QZE} \exp\left[\frac{E}{RT_{кр}}\right], \quad (3)$$

где  $T_{кр}$  – критическая температура ВВ;  
 $C_v$  – теплоемкость ВВ при этой температуре;  
 $Q$  – теплота разложения ВВ;  
 $Z, E$  – параметры уравнения Аррениуса;  
 $R$  – газовая постоянная.

Время уплотнения ВВ характеризуется временем действия внешнего давления на заряд ВВ. Его можно выразить следующим образом:

$$t_y = \frac{r_0 - r(P_{кр})}{U'}, \quad (4)$$

где  $r_0$  – исходный радиус заряда ВВ;  
 $r(P_{кр})$  – радиус заряда, соответствующий критическому давлению детонации заряда ВВ;  
 $U'$  – скорость сжатия заряда ВВ.

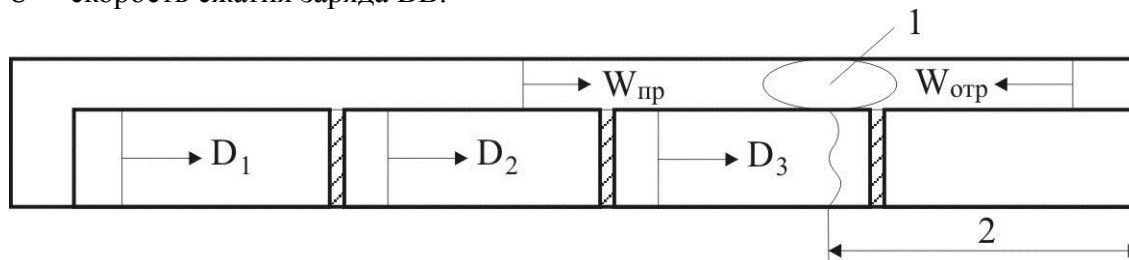


Рис. 1. Схема детонации составного шпурового заряда  
 1 – зона встречи отраженной ударной волны с детонационным фронтом; 2 – зона переуплотнения ВВ и возможного отказа детонации

Согласно работе [7], можно оценить скорость сжатия пористого вещества для случая, когда ударная волна, сжимающая заряд, скользкая (распространение ударной волны в зазоре), по формуле:

$$U' = P \left(1 - \frac{1}{k}\right) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_1}\right), \quad (5)$$

где  $P$  – давление во фронте ударной волны, сжимающее заряд;  
 $k$  – степень сжатия воздуха в заряде,  $k=7$  по данным [7];  
 $\rho_0, \rho_1$  – плотность, относящаяся к исходному ВВ, и плотность ВВ, которая соответствует действию критического давления.

По результатам экспериментальных работ [8], а также с учетом теплофизических констант ВВ [9] и критической температуры его воспламенения  $T_{кр}=750$  К по данным работы [10], оценим устойчивость детонации шпурового составного заряда аммонита 6 ЖВ по критерию (1):

- время химической реакции  $t_{x.p.}=4,246 \cdot 10^{-6}$  с;

- время задержки  $t_3=3,92*10^{-5}$  с;
- общее время развития детонации в заряде ВВ  $t_0=4,34*10^{-5}$  с;
- время уплотнения ВВ в заряде ударной волной  $t_y=9,21*10^{-5}$  с.

Таким образом, время детонации и уплотнения ВВ – одного порядка. Оценка по критерию (1) дает результат о возможности реализации такого механизма действия ударной волны и его влиянии при канальном эффекте на детонацию ВВ в заряде, в котором имеются стыки между патронами. Однако, сделанный аналитический расчет не позволяет учитывать количество стыков в заряде, т.к. задержка детонации ВВ на стыке отождествлялась как предельный случай. В действительности предельные случаи инициирования детонации ВВ с задержкой не всегда реализуются на одном стыке между патронами, с увеличением числа стыков вероятность такого процесса возрастает и он может в конце концов определять устойчивость детонации ВВ. Это подтвердили экспериментальные работы В.И. Зенина [11]. Обобщенные экспериментальные данные этих работ приведены в таблице 1.

Используя полученные результаты, можно оценить количество стыков между патронами в шпурах, обеспечивающих с вероятностью 0,99 прекращение детонации заряда ВВ. Если вероятность прекращения детонации ВВ на стыках между патронами 0,05, с помощью вероятностных статистических методов оценки, используя интегральную теорему Лапласа, определяем число стыков в заряде для отказа детонации ВВ в шпуре. При заданной вероятности прекращения детонации ВВ на стыке получается, что при общем количестве стыков между патронами в зарядах равном  $n=144$  детонация обязательно затухнет.

Для условий Донбасса, при проведении горизонтальных и наклонных горных выработок при БВР в среднем используется 40...60 шпуров с зарядами, состоящими из 3..6 патронов ВВ. Оценим общее количество стыков между патронами ВВ и вероятность отказов в шпурах для этих условий взрывных работ. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Как видно из табл.2, только в 35% случаев параметры БВР позволяют, иметь количество стыков в шпуровых зарядах меньше 144. Соответственно, в 65% случаев при БВР с вероятностью 99% будут наблюдаться отказы детонации шпуровых зарядов. Это требует создание конструкции шпурового заряда без стыков между патронами ВВ.

**Выводы.** Резюмируя результаты исследований по устойчивости детонации шпурового заряда, состоящего из отдельных патронов ВВ, можно сделать следующие выводы:

Таблица 1. Вероятность неполной детонации заряда ВВ при канальном эффекте

ВВ	Число патронов в заряде	Число стыков между патронами	Количество опытов	Число неполных детонаций	Вероятность затухания детонации на стыке
Аммонит №БЖВ	10	9	2	1	0,05
- завод «А»	10	9	12	10	0,09
- завод «Б»	11	10	20	11	0,05
- завод «В»					
Детонит М	7	6	7	4	0,09
Детонит-10А	9	8	7	2	0,04

Таблица 2. Количество стыков между патронами при БВР для условий Донбасса

		Число шпуров в забое				
		40	45	50	55	60
Число патронов в шпуре	3	80	90	100	110	120
	4	120	135	150	165	180
	5	160	180	200	220	240
	6	200	225	250	275	300

1. Сопоставление времени детонации заряда с временем динамического уплотнения ВВ при канальном эффекте показывает, что этого времени может быть достаточно для установления критических значений параметров детонации, особенно с учетом задержек времени инициирования на стыках патронов. Увеличение числа стыков между патронами ВВ приводит к отказам и неполной детонации.

2. Вероятностными статистическими методами оценки с использованием экспериментальных данных по числу отказов детонации ВВ в шпурах установили, что предельное количество стыков между патронами, приводящее с вероятностью 99% к отказу детонации шпурового заряда аммонита 6ЖВ равно 144.

3. Надежным способом обеспечения устойчивости детонации ВВ в шпурах является использование монозарядов и зарядание шпура на полное сечение.

#### Список литературы

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. Калякин С.А., Лабинский К.Н. Исследование неидеальных режимов детонации промышленных ВВ/ Калякин С.А., Лабинский К.Н// Весник КДПУ им. М. Остроградского. Вып. 6/2009. Ч. 1. – Кременчуг, 2009. – С159-165.

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. Jones H. Proc. Roy. Soc. A 189, 415, 1947.

6. Песоцкий М.К. Особенности детонации многопатронных рассредоточенных зарядов ВВ / Песоцкий М.К., Расторгуев В.М., Попова А.С. / В кн. Безопасность взрывных работ, улучшение проветривания в угольных шахтах. МакНИИ, Макеевка. – 1982, С. 9-14.

7. Афанасенков А.Н. Критические давления инициирования взрывчатых веществ / Афанасенков А.Н., Богомоллов В.М., Воскобойников И.М. // Взрывное дело, №68/25, М.: Недра, 1970. С 68-92.

8. Шведов К.К. О параметрах детонации промышленных ВВ и их сравнительной оценке / Шведов К.К., Дремин А.Н. // Взрывное дело, №76/33, М.: Недра, 1976. С. 137.

9. Физика взрыва // Под ред. К.П Станюковича.– М.: Недра, 1975.– 704 С.

10. Андреев К.К. Теория взрывчатых веществ / Андреев К.К., Беляев А.Ф. М.: Оборонгиз, 1960. 695 с.

11. Об устойчивости детонации патронированных ВВ в породных забоях подготовительных выработок / В.И. Зенин и др. // Взрывное дело, №80/37. – М.: Недра, 1978. С. 214-221.