

УДК 622.235.5

С.А. Калякин (д-р техн.наук, проф.)

К.Н. Лабинский (канд.техн.наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет, Донецк

Н.А. Новикова (гл. технолог)

Донецкий казенный завод химических изделий

И.А. Ефремов (д-р техн.наук)

Донецкий национальный технический университет, Донецк

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ МОНОЗАРЯДА ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО ВВ, СОСТОЯЩЕГО ИЗ ОТДЕЛЬНЫХ ПАТРОНОВ

В работе приведены результаты исследования скорости детонации монозаряда, состоящего из отдельных патронов высокопредохранительного аммонита V класса. Установлена зависимость скорости детонации аммонита от плотности патронирования ВВ и удельного содержания сенсibilизатора в его составе. Показано влияние стыка между патронами ВВ на скорость распространения детонационной волны в составном заряде, приводящее к снижению средней скорости детонации и ее устойчивости по длине заряда ВВ. Обоснованы предохранительные свойства ВВ в зарядах с полимерными оболочками.

Ключевые слова: скорость детонации, монозаряд ВВ, сенсibilизатор, стыки, ионизационные датчики, предохранительные свойства ВВ, оболочка патрона

Введение. В настоящее время буровзрывным способом в угольных шахтах проводится более 65% горных выработок. В особо опасных забоях горных выработок для ведения взрывных работ используются патронированные предохранительные взрывчатые вещества (ПВВ) IV...VI классов, при этом шпуровой заряд состоит из нескольких патронов ПВВ, запираемых в шпуре забойкой. Шпуровые заряды, состоящие из отдельных патронов ПВВ, имеют особенности и аномалии детонации, связанные с неустойчивостью процесса детонации по длине заряда ВВ в шпуре. Поэтому скорость детонации ВВ и передача детонации от патрона патрону должны удовлетворять определенным требованиям, обеспечивающим устойчивость детонации составного шпурового заряда. Наиболее легко данные требования к детонационной способности ВВ могут быть реализованы у монозарядов, состыкованных из отдельных патронов ВВ.

Анализ последних исследований и публикаций, показал, что параметры детонации ПВВ зависят от вида и типа сенсibilизатора в его составе, диаметра патрона и плотности патронирования ВВ. Установлено сильное влияние скорости детонации ВВ на его уровень предохранительных свойств у открытых зарядов в метано-воздушной смеси (МВС). Поэтому необходимо достижение определенного компромисса между величиной скорости детонации ВВ и его уровнем предохранительных свойств в МВС. До настоящего времени нет достоверных исследований влияния на скорость детонации плотности патронирования и содержания сенсibilизатора в составе ВВ, находящегося в зарядах со стыкующимися между собой полимерными оболочками, составляющими монозаряд.

Исследования влияния параметров детонации на предохранительные свойства ВВ и его устойчивость детонации шпурового монозаряда являются актуальными при создании новых более совершенных и безопасных ПВВ.

Целью работы является исследование скорости детонации шпуровых монозарядов ПВВ, состоящих из отдельных патронов высокопредохранительных ВВ, а также обоснование его предохранительных свойств и устойчивости детонации ВВ в шпуре.

Материалы и результаты исследований. В условиях Донецкого казенного завода химических изделий была проведена работа по исследованию скорости детонации нового предохранительного аммонита V класса в патронах диаметром 36 мм, имеющих стыкующиеся полиэтиленовые оболочки. В составе предохранительного аммонита V класса используются сенсibilизатор тонкодисперсный амматол (различного состава) и ионообменная смесь солей, состоящая из NaNO_3 , NH_4Cl и формиата кальция. Исследования проводились на монозарядах, состоящих из двух патронов, общей массой ВВ около 0,5 кг. При исследовании параметров детонации ВВ варьировались его плотность патронирования в патронах и процент содержания сенсibilизатора в составе. Схема размещения ионизационных датчиков в заряде для измерения скорости детонации представлена на рис. 1. В качестве измерителя интервалов времени использовался прибор для измерения интервалов времени ИИВ-16/496 УХЛ 4.2 (ТУ У 33.5-3169501990-001:2011). В результате проведения серии опытов были получены средние значения скорости детонации в активном и пассивном патронах в зависимости от плотности патронирования ВВ и содержания в его составе сенсibilизатора. Обобщенные результаты исследований представлены в табл. 1.

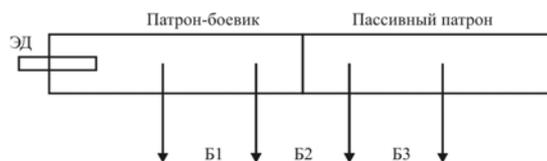


Рис. 1. Схема измерения скорости детонации.
Б1, Б2, Б3 – базы измерения

Таблица 1 – Средние значения скорости детонации заряда при разных значениях плотности патронирования ВВ и содержания в нем сенсibilизатора

№ опыта	Плотность патронирования ρ , г/см ³	Удельное содержание амматола $C_{ам}$	Скорость детонации D , м/с	$\rho C_{ам}$
1	1.150	0.33	2876	0.380
2	1.025	0.29	2422	0.297
3	1.056	0.29	2535	0.306
4	1.060	0.29	2560	0.307
5	1.078	0.29	2704	0.313
6	1.120	0.24	2058	0.269
7	1.140	0.22	1949	0.251
8	1.100	0.23	2040	0.253
9	1.200	0.23	2148	0.276

Корреляционный анализ приведенных в табл.1 данных позволил установить зависимость скорости детонации ВВ от значения произведения плотности патронирования на удельное содержание в его составе сенсibilизатора ($\rho C_{ам}$). Эмпирическая зависимость имеет следующий вид:

$$D=13.84+8009.24(\rho C_{ам}), \text{ м/с.} \quad (1)$$

График этой зависимости показан на рис. 2.

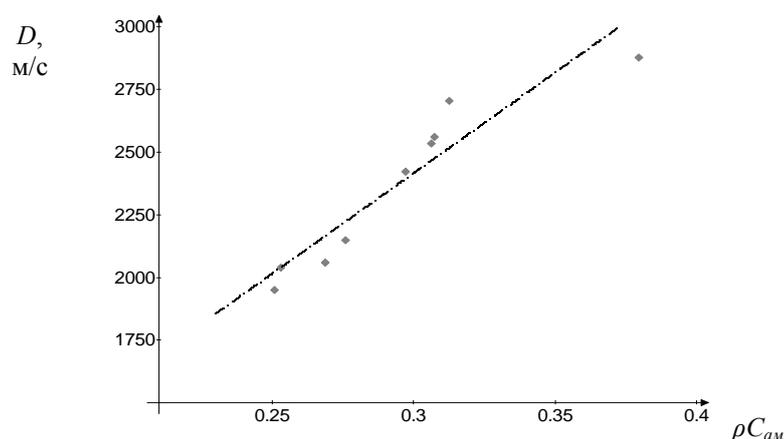


Рис. 2. График зависимости скорости детонации ВВ от $\rho C_{ам}$.

Зависимость (1) показывает как совместное влияние плотности патронирования и содержание сенсibilизатора в составе ВВ определяет его скорость детонации в заряде. Для установления влияния на скорость детонации ВВ по отдельности каждого фактора - ρ и $C_{ам}$, необходимо выполнить полный факторный эксперимент.

Для этого составим расширенную матрицу планирования полного факторного эксперимента (табл. 2), в котором будут учитываться влияние на скорость детонации ВВ не только каждого из факторов, но и их взаимодействие.

Таблица 2 – Расширенная матрица планирования полного факторного эксперимента

Опыт	ρ'	$C'_{ам}$	$\rho' C'_{ам}$	D
1	-1	-1	+1	1864*
2	+1	-1	-1	1949
3	-1	+1	-1	2789*
4	+1	+1	+1	2876

* – значения определены по зависимости (1)

В приведенной матрице значения ρ' и $C'_{ам}$ кодируются в соответствии с таблицей кодирования факторов (табл. 3).

Таблица 3 – Кодирование факторов

Интервал варьирования и уровень факторов	Плотность патронирования ρ , г/см ³	Удельное содержание сенсibilизатора $C_{ам}$
Нулевой уровень	1,10	0,275
Интервал варьирования	0,05	0,055
Нижний уровень	1,05	0,220
Верхний уровень	1,15	0,330

Расчет коэффициентов регрессии позволил установить зависимость скорости детонации аммонита V класса от плотности патронирования и удельного содержания сенсibilизатора в его составе:

$$D=2369.5+43.0 \rho'+463.0 C'_{ам}+0.5\rho' C'_{ам}. \quad (2)$$

Учитывая, что факторы в уравнении (2) представлены в кодированном виде, проведем их расшифровку по следующей формуле:

$$x_i=(X_i-X_{i0})/\Delta_i, \quad (3)$$

где X_i – натуральное значение фактора;

X_{i0} – значение фактора на нулевом уровне;

Δ_i – интервал варьирования фактора.

Преобразуя уравнение (2) с учетом (3), получим окончательную зависимость скорости детонации аммонита от плотности патронирования и удельного содержания сенсibilизатора:

$$D=2369.5+43.0(\rho-1.10)/0.05+463.0(C_{ам}-0.275)/0.055+0.5(\rho-1.10)(C_{ам}-0.275)/(0.05*0.055),$$

или

$$D= -836.5+810.0\rho+8218.2C_{ам}+181.8\rho C_{ам}, \text{ м/с}. \quad (4)$$

Рассчитаем скорость детонации аммонита по уравнению модели (4) и сравним эти значения с экспериментальными данными, полученными в эксперименте. Результаты этих расчетов представлены в табл. 4. Сравним среднее значение скорости детонации ВВ, определенное в эксперименте и полученное в результате расчета по уравнению (4).

Таблица 4 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений скорости детонации аммонита

№ опыта	Плотность патронирования ρ , г/см ³	Удельное содержание амматола $C_{ам}$	Скорость детонации D , м/с	Расчетная скорость детонации D_p , м/с
1	1.150	0.33	2876	2876
2	1.025	0.29	2422	2431
3	1.056	0.29	2535	2458
4	1.060	0.29	2560	2461
5	1.078	0.29	2704	2477
6	1.120	0.24	2058	2092
7	1.140	0.22	1949	1940
8	1.100	0.23	2040	1991
9	1.200	0.23	2148	2076

Оценку значимости и достоверности результатов измерений дадим, определив среднеквадратичную ошибку среднего арифметического по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}},$$

где Δx_i – разница теоретической и полученной опытным путем скорости детонации по каждому эксперименту;
 n – количество экспериментов.

$$S = \sqrt{\frac{76272.24}{9(9-1)}} = 32.54 \quad (5)$$

Задавшись надежностью $P=0,95$, получим коэффициент Стьюдента, который умножим на среднеквадратичную ошибку среднеарифметического (5) и оценим абсолютные допустимые границы ошибки измерений:

$$\Delta = 32,54 * 2,365 = 77,0 \text{ м/с.} \quad (6)$$

Анализируя полученные результаты, видим, что значения скорости в опытах 3,4 и 9 близки к границам доверительного интервала, а в опыте 5 скорость несколько выходит за его пределы. Таким образом установили, что относительное отклонение расчетных данных от опытных не превышает 4% за исключением опыта №5 в котором отклонение скорости составляет около 9%.

Однако, полученную зависимость скорости детонации по модели (4) можно использовать только для расчета скорости детонации заряда ВВ без стыков между патронами ВВ. На практике шпуровые заряды состоят из нескольких патронов ВВ. Следовательно, заряд имеет несколько стыков между патронами, на которых возможны процессы, затрудняющие передачу детонации между патронами. В результате этого скорость детонации в пассивном патроне может быть гораздо меньшей, чем на патроне-боевике. В этом случае устойчивость детонации заряда может быть нарушена, так как на следующем стыке возможен отказ детонации при ее передаче.

Исследования по выявлению влияния на скорость детонации аммонита наличие стыка в заряде и его влияние на устойчивость детонации проведены как на открытых зарядах, уложенных на землю, так и на зарядах в металлических трубах с внутренним диаметром 43 мм при наличии зазора между поверхностью заряда и стенкой трубы. Данные этих исследований приведены в табл. 5, а результаты экспериментов на рис. 3.

Результаты опытов показали, что падение скорости детонации на стыке у открытого заряда ВВ с содержанием 33% сенсibilизатора составило всего 6% относительно скорости детонации ВВ патрона-боевика, в то время как у заряда ВВ с 23% сенсibilизатора падение скорости на стыке пассивного патрона составило уже 10%. При взрывании зарядов в трубах в условиях проявления канального эффекта падение скорости детонации заряда ВВ с 33% сенсibilизатора на стыке патронов составило 6% – столько же, сколько и у открытого заряда, а у заряда ВВ с 23% сенсibilизатора падение скорости детонации на стыке пассивного патрона резко возросло и составило уже 34%.

Таблица 5 – Результаты экспериментов по определению скорости детонации заряда ВВ и его устойчивости детонации в металлической трубе диаметром 43 мм

ПВВ	Средняя плотность ВВ, г/см ³	Удельное содержание сенсibilизатора в ВВ	Скорость детонации ВВ, м/с								Устойчивость детонации
			Открытый заряд				Заряд в трубе с зазором				
			Б1	Б2	Б3	Средняя скорость	Б1	Б2	Б3	Средняя скорость	
Аммонит V	1,08	0,33	2876	2715 (0,94) ¹	2902	2831 ²	3055	2864 (0,94) ¹	3092	3003	Полная
	1,10	0,23	2091	1879 (0,90) ¹	2025	1998 ³	2121	1412 (0,66) ¹	2009	1847	Полная

¹ в скобках указано отношение скорости детонации на стыке к скорости детонации патрона-боевика;

² расчетная скорость детонации по модели (4) 2815 м/с;

³ расчетная скорость детонации по модели (4) 1991 м/с.

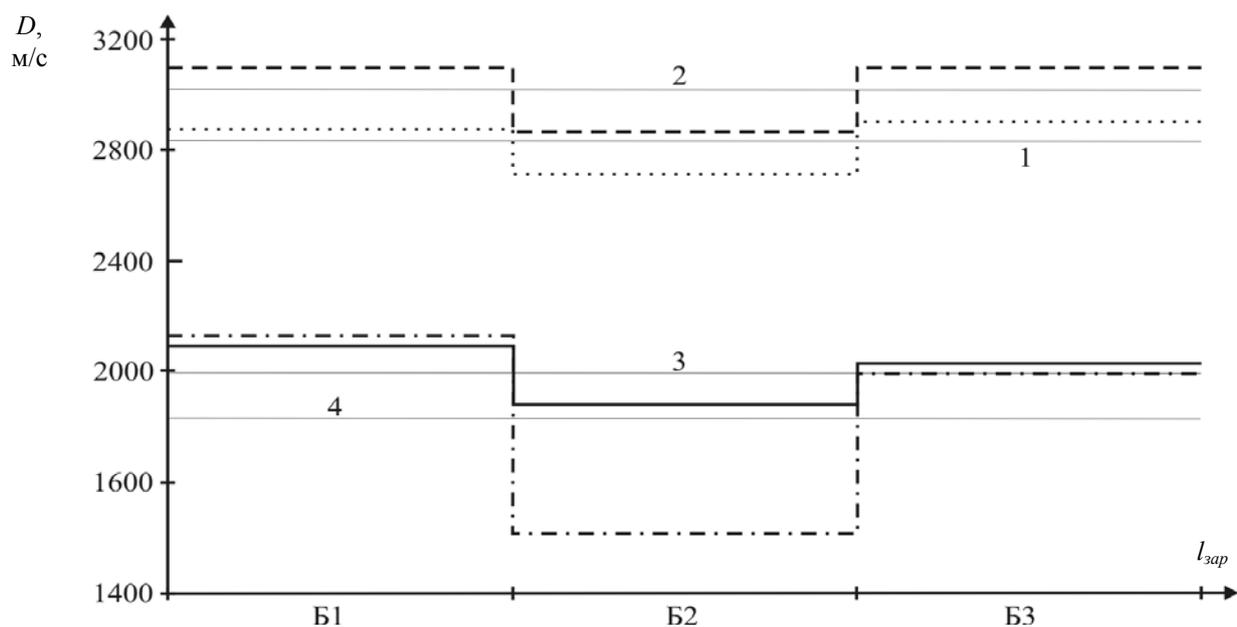


Рис. 3. Скорость детонации ВВ по базам измерения:

· · · · - $\rho = 1,08$ г/см³, $C_{ам} = 0,33$, открытый заряд; 1 – средняя скорость открытого заряда при $\rho = 1,08$ г/см³, $C_{ам} = 0,33$; - - - $\rho = 1,08$ г/см³, $C_{ам} = 0,33$, заряд в трубе; 2 – средняя скорость заряда в трубе при $\rho = 1,08$ г/см³, $C_{ам} = 0,33$; · · · · - $\rho = 1,10$ г/см³, $C_{ам} = 0,23$, открытый заряд; 3 – средняя скорость открытого заряда при $\rho = 1,10$ г/см³, $C_{ам} = 0,23$; — — — $\rho = 1,10$ г/см³, $C_{ам} = 0,23$, заряд в трубе; 4 – средняя скорость заряда в трубе при $\rho = 1,10$ г/см³, $C_{ам} = 0,23$.

Таким образом исследования показали, что падение скорости детонации на стыке патронов в монозаряде зависит от содержания сенсibilизатора в составе ВВ. У аммонита с высоким содержанием сенсibilизатора в составе при взрывании в прочной трубе средняя скорость детонации заряда ВВ возросла в 1,06 раза. В

этих же условиях взрывания средняя скорость детонации заряда аммонита, содержащего в своем составе меньшее количество сенсibilизатора (23,0% против 33,0%) уменьшилась примерно в 0,92 раза. Это указывает на то, что восприимчивость к детонации ВВ на стыках между патронами играет важную роль. Все это позволяет сделать ряд выводов которые помогут в разработке конструкции шпурового заряда ВВ, имеющего высокую устойчивость детонации ВВ.

Хорошо известно влияние скорости детонации ПВВ на величину его предельного открытого заряда в МВС. Согласно работе [3], величина предельного открытого заряда ПВВ в МВС определяется плотностью патронирования ВВ и его скоростью детонации:

$$M_{np} = \frac{1,18942 \cdot 10^{16}}{\rho_{BB}^{0,5015} \cdot D^{4,5045} \cdot k}, \text{ кг.} \quad (7)$$

Зависимость (7) позволяет определить, насколько может уменьшиться предельный заряд ПВВ, запатронированного в полиэтиленовую оболочку по сравнению с бумажной. Для этого в это уравнение вводим поправочный коэффициент учитывающий изменение уровня предохранительных свойств ВВ при его взрывании в полиэтиленовой оболочке по отношению к бумажной. Опытами в опытном штреке с взрывчатой МВС установили, что в среднем снижение уровня предохранительных свойств ВВ в полиэтиленовой оболочке по сравнению с бумажной составляет примерно $k=2,3$ раза. Результаты расчетов предельных зарядов в МВС для монозарядов в полиэтиленовой оболочке при различной плотности патронирования ВВ и содержания в предохранительном аммоните сенсibilизатора даны в табл. 6.

Таблица 6 – Предельный заряд у монозаряда в полиэтиленовой оболочке от скорости детонации предохранительного аммонита и его плотности

№ состава ВВ	Плотность патронирования ρ , г/см ³	Удельное содержание аммотола $C_{ам}$	Скорость детонации D , м/с	Расчетный предельный заряд ПВВ, M_{np} , кг
1	1.150	0.20	1780,5	0,344
2	1.025	0.21	1758,7	0,385
3	1.056	0.22	1869,1	0,288
4	1.060	0.23	1956,6	0,234
5	1.078	0.24	2056,1	0,186
6	1.120	0.21	1839,3	0,301
7	1.140	0.22	1940,5	0,235
8	1.100	0.21	1822,3	0,317
9	1.200	0.20	1822,7	0,303

Анализ данных табл. 6 позволяет установить требуемые скорости детонации ВВ и его плотность патронирования в монозаряде с полимерной оболочкой, при которых достигается уровень предохранительных свойств ПВВ, соответствующий ВВ V класса. Так ПВВ V класса в монозарядах с полимерной оболочкой должны иметь плотность патронирования ВВ 1,05...1,15 г/см³ и содержание сенсibilизатора в составе не более 22%.

Выводы.

1. Получена эмпирическая модель, позволяющая рассчитать скорость дето-

нации ВВ в зависимости от плотности его патронирования в монозаряде и содержания сенсibilизатора в составе ВВ.

2. Скорость детонации ВВ в монозаряде обусловлена влиянием стыка на скорость детонации в пассивном патроне. Поэтому детонационная способность ПВВ должна быть такой, чтобы обеспечить передачу детонации от патрона к патрону с минимальным снижением скорости детонации в пассивных патронах.

3. Падение скорости детонации на стыках патронов зависит от содержания сенсibilизатора в составе и условий взрывания заряда ВВ. Установлено, что при содержании в предохранительном аммоните сенсibilизатора амматола в количестве 21...23% можно обеспечить устойчивую детонацию монозаряда в шпурах в условиях проявления канального эффекта.

4. Аммонитные ПВВ V класса в монозарядах с полимерной оболочкой должны иметь плотность патронирования $1,05...1,15 \text{ г/см}^3$ и содержание сенсibilизатора в ВВ не более 22%.

Перечень использованной литературы

1. Калякин С.А. 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.

2. Лабинский К.Н. Исследование устойчивости нестационарно детонирующих шпуровых зарядов // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2010». – Д.: Національний гірничий університет, 2010. – С. 183-188.

3. Калякин С.А. Критические условия инициирования взрыва метано-воздушной смеси открытым зарядом взрывчатого вещества / С.А.Калякин // Взрывное дело, №97/54.-М.: «ЗАО «МВК по взрывному делу», 2007. - с 170-181.

Надійшла до редколегії 23.05.2012

С.А. Калякін, К.Н. Лабінський, Н.А. Новікова, І.О. Єфремов
Донецький національний технічний університет, Донецьк
Донецький казенний завод хімічних виробів, Донецьк
ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКІСТІ ДЕТОНАЦІЇ МОНОЗАРЯДА ЗАПОБІЖНОГО ВР, ЩО СКЛАДАЄТЬСЯ
З ОКРЕМИХ ПАТРОНІВ

В роботі наведені результати дослідження швидкості детонації монозаряду, що складається з окремих патронів високозапобіжного амоніту V класу. Встановлено залежність швидкості детонації амоніту від щільності патрунування ВР і питомого вмісту сенсibilізатора в його складі. Показано вплив стику між патронами ВР на швидкість поширення детонаційної хвилі в складеному заряді, що приводить до зниження середньої швидкості детонації і її стійкості по довжині заряду ВР. Обґрунтовано запобіжні властивості ВР в зарядах з полімерними оболонками.

Ключові слова: швидкість детонації, моно заряд ВР, сенсibilізатор, стики, іонізаційні датчики, запобіжні властивості ВР, оболонка патрона.

S.A. Kalyakin, K. N. Labinsky, N. A. Novikov, I. O. Efremov
Donetsk National Technical University, Donetsk

Donetsk state plant chemical products, Donetsk

INVESTIGATION OF SPEED DETONATION MONOZARYADA RELIEF EXPLOSIVES CONSIST OF SEPARATE CARTRIDGES

The results of a study of the detonation velocity of monocharge which consists from separate cartridges of high-permissible ammonite of V class are shown in this article. The dependence of the velocity of detonation of ammonite from the density of explosive and from the content of the sensitizer in its composition is determined. The influence of the junction between the cartridges of explosive at the velocity of propagation of a detonation wave in a composite charge, leading to decrease a detonation speed of the explosive charge is shown. The protective properties of the explosive charges in the polymer cartridges are grounded.

Key words: detonation velocity, monocharge, sensitizer, joints, ionization detectors, permissible properties of explosives, cartridge of the explosive.