

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДА ВВ, СОСТОЯЩЕГО ИЗ ОТДЕЛЬНЫХ ПАТРОНОВ

*К.Н. Лабинский, к.т.н., доц.*

*Донецкий национальный технический университет*

*83000, г. Донецк, ул. Артема, д. 58. E-mail: [bootor@gmail.com](mailto:bootor@gmail.com)*

В работе приведены результаты исследования устойчивости детонации заряда, состоящего из отдельных патронов высокопредохранительного аммонита V класса. Установлена зависимость скорости детонации аммонита от плотности патронирования ВВ, 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.

Ключевые слова: устойчивость детонации, заряд ВВ, сенсibilизатор, стыки, ионизационные датчики.

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ДЕТОНАЦІЇ ЗАРЯДУ ВР, ЩО СКЛАДАЄТЬСЯ З ОКРЕМИХ ПАТРОНІВ

*К.М. Лабінський, к.т.н., доц.*

*Донецький національний технічний університет*

*83000, м. Донецьк, вул. Артема, буд. 58. E-mail: [bootor@gmail.com](mailto:bootor@gmail.com)*

У роботі наведені результати дослідження стійкості детонації заряду, що складений з окремих патронів високозапобіжного амоніту V класу. Встановлена залежність швидкості детонації амоніту від щільності патрунування ВР, питомого вмісту сенсibilізатору у його складі. Показаний вплив стику між патронами ВР на швидкість розповсюдження детонаційної хвилі у складеному заряді, що призводить до зниження середньої швидкості детонації та стійкості уздовж заряду.

Ключові слова: стійкість детонації, заряд ВР, сенсibilізатор, стику, іонізаційні датчики.

## THE RESEARCHING OF STABILITY OF DETONATION OF EXPLOSIVES' CHARGE WHICH CONSISTS FROM SEPARATE CARTRIGES

*K.N. Labinskiy, Assoc. Prof.*

*Donetsk State Technical University*

*83000, Donetsk, Artyoma str., 58. E-mail: [bootor@gmail.com](mailto:bootor@gmail.com)*

The results of researching of stability of charge's detonation, which consists from separate charges of high-preventive ammonite, are shown in this article. The dependence of speed of detonation from density and specific consistence of sensitizer is determined. The influence of the junction between the charges on the speed of detonation's distribution in the composite charge, that brings to decreasing of average speed of detonation and her stability is shown.

Keywords: stability of detonation, charge of explosive, sensitizer, junction, ionization sensors.

**Введение.** В настоящее время буровзрывным способом проводится более 65% горных выработок. В подавляющем большинстве случаев при ведении взрывных работ используются патронированные промышленные взрывчатые вещества (ВВ) II...VI классов, а шпуровой заряд составляется из нескольких патронов ВВ, запираемых забойкой в шпуре. Промышленные взрывчатые вещества, как правило, представляют собой физически и химически неоднородные смеси из двух и более компонентов: сенсibilизатора, который обеспечивает детонацию ВВ и солей-ингибиторов, обеспечивающих безопасность ведения взрывных работ в шахтах. Шпуровые заряды, состоящие из отдельных патронов промышленных ВВ при детонации имеют ярко выраженные особенности и аномалии процесса детонации, связанные с устойчивостью детонации по длине заряда ВВ, которые недостаточно изучены.

Скорость детонации ВВ и передача детонации от патрона патрону в разной степени влияют на устойчивость детонации составного шпурового заряда. Экспериментальные и теоретические исследования процесса детонации ВВ в шпурах позволят установить характер распространения детонации по патронам и механизм ее передачи через их стыки, что позволит обосновать условия устойчивости распространения детонации ВВ в шпуровых зарядах.

**Анализ последних исследований и публикаций,** показал, что детонационные параметры ВВ могут быть связаны с неидеальным режимом протекания химических реакций при детонации. Неидеальный режим детонации объясняется тем, что общее время и полнота завершения химических реакций при детонации зависят от скорости разложения и сгорания отдельных частиц ВВ и от скорости вторичных реакций, за фронтом детонационной волны [1].

Особенности детонации промышленных ВВ связаны с растянутостью зоны химических реакций и большим, чем у индивидуальных ВВ, критическим диаметром детонации. Кроме того, при взрывании шпуровых зарядов на процесс детонации влияет переуплотнение заряда ВВ от действия опережающей детонационную волну ударной волны в зазоре шпура, и наличие стыков между патронами ВВ.

На сегодняшний день актуальным является вопрос исследования влияния на устойчивость детонации шпурового заряда ВВ его параметров детонации и различных факторов, характеризующих конструкцию шпурового заряда, число стыков между патронами и наличие зазора между зарядом и стенкой шпура.

**Целью работы** является исследование устойчивости детонации шпуровых зарядов ВВ, состоящих из отдельных патронов патронированных высокопредохранительных ВВ.

**Материалы и результаты исследований.** На полигоне Донецкого казенного завода химических изделий была проведена серия опытов по исследованию скорости детонации аммонита (V класс) в патронах диаметром 36 мм, имеющих полиэтиленовую оболочку. В составе предохранительного аммонита-V используются сенсibilизатор амматол (различного состава) и ионообменная смесь солей, состоящая из  $\text{NaNO}_3$ ,

$\text{NH}_4\text{Cl}$  и формиата кальция. Исследования проводились на зарядах, состоящих из двух патронов. При исследовании параметров детонации ВВ варьировалась плотность патронирования патронов 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 ВВ) для определенного сочетания плотности патронирования и содержания сенсibilизатора в составе ВВ. Обобщенные результаты представлены в табл. 1.

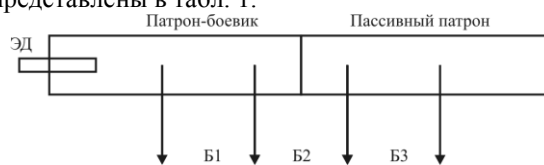


Рис. 1. Схема измерения скорости детонации. Б1, Б2, Б3 – базы измерения.

Таблица 1. Средние значения скорости детонации ВВ при разных значениях плотности патронирования и содержании сенсibilизатора

№ опыта	Плотность патронирования $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Удельное содержание амматол $C_{ам}$	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 данных позволил установить взаимосвязь скорости детонации ВВ от значения произведения плотности патронирования на удельное содержание сенсibilизатора ( $\rho * C_{ам}$ ). Эмпирическая зависимость имеет следующий вид:

$$D = 13.84 + 8009.24(\rho * C_{ам}). \quad (1)$$

График этой зависимости показан на рис. 2.

Зависимость (1) показывает только совместное влияние плотности патронирования и содержания сенсibilизатора в составе ВВ на его скорость детонации. Для установления влияния на скорость детонации ВВ по отдельности каждого фактора -  $\rho$  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	$\rho'$	$C'_{ам}$	$\rho' * C'_{ам}$	$D$
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  $\rho'$  и  $C'_{ам}$  кодируются в соответствии с таблицей кодирования факторов (табл. 3).

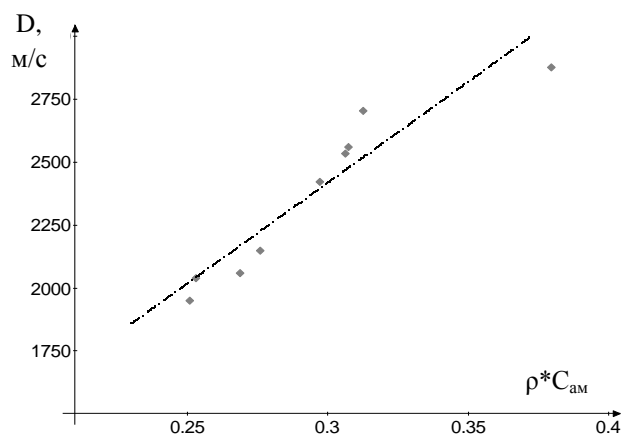


Рис. 2. График зависимости скорости детонации ВВ от  $\rho \cdot C_{ам}$ .

Расчет коэффициентов регрессии позволил установить зависимость скорости детонации аммонита V класса от плотности патронирования

Таблица 3. Кодирование факторов

Интервал варьирования и уровень факторов	Плотность патронирования $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	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

Рассчитаем скорость детонации аммонита по полученной модели (4) и сравним эти значения с экспериментальными данными, полученными в эксперименте. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Сравнение расчетных и экспериментальных значений скорости детонации аммонита

№ опыта	Плотность патронирования $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Удельное содержание аммонита $C_{ам}$	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  $\Delta x_i$  – разница теоретической и полученной опытным путем скорости детонации по каждому эксперименту;  
 $n$  – количество экспериментов.

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

и удельного содержания сенсibilизатора в его составе:

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

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;

$\Delta_i$  – интервал варьирования фактора.

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

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

или

$$D = -836.5 + 810.0 \cdot \rho + 8218.2 \cdot C_{ам} + 181.8 \cdot \rho \cdot C_{ам} \quad (4)$$

Сравним среднее значение скорости детонации ВВ определенное в эксперименте и полученное в результате расчета по уравнению (4).

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

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

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

Однако, 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 скорости

детонации аммонита и наличие стыка в заряде на его устойчивость детонации проведены на открытых зарядах, уложенных на землю, и на зарядах в металлических трубах внутренним диаметром 43 мм при наличии зазора между поверхностью заряда и стенкой трубы. Данные этих исследований приведены в табл. 5 и интерпретированы к условиям проведенных экспериментов на рис. 3.

Результаты опытов показали, что падение скорости детонации на стыке у открытого заряда ВВ с 33% сенсibilизатора составило 6% относительно скорости детонации патрона-боевика, в то время как у заряда ВВ с 23%

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 <sup>3</sup>	Удельное содержание сенсibilизатора в составе ПВВ	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) <sup>1</sup>	2902	2831 <sup>2</sup>	3055	2864 (0,94) <sup>1</sup>	3092	3003	Полная
	1,10	0,23	2091	1879 (0,90) <sup>1</sup>	2025	1998 <sup>3</sup>	2121	1412 (0,66) <sup>1</sup>	2009	1847	полная

<sup>1</sup> в скобках указано отношение скорости детонации на стыке к скорости детонации патрона-боевика;

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

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

сенсibilизатора падение скорости на стыке пассивного патрона составило 10%. При взрывании в трубах падение скорости детонации заряда ВВ с 33% сенсibilизатора на стыке патронов также 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%.

Таким образом исследования показали, что падение скорости детонации на стыке патронов зависит от содержания сенсibilизатора в составе ВВ. Было выявлено, что влияние условий взрывания зарядов ВВ также оказывают различное влияние на скорость детонации заряда 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.

#### Выводы.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования позволили сделать следующие выводы.

1) Получена модель, позволяющая рассчитать скорость детонации ВВ в зависимости от плотности его патронирования и содержания сенсibilизатора в составе ВВ для заряда без стыков между патронами. Отклонение расчетных данных скорости детонации ВВ от эксперимента не превышает 4...9%.

2) Скорость детонации ВВ для открытых зарядов с одним стыком характеризуется влиянием стыка на скорость детонации в пассивном патроне. При этом она снижается примерно в 0,9...0,94 раза по сравнению со скоростью детонации ВВ в патроне боевика. В трубе с зазором влияние стыка на скорость детонации ВВ различное и определяется содержанием сенсibilизатора в составе ВВ.

3) Падение скорости детонации на стыках зависит от содержания сенсibilизатора в составе и условий взрывания заряда ВВ. Поэтому

необходимо провести дополнительные исследования по выявлению влияния количества стыков в заряде ВВ и его восприимчивости к

детонации на среднюю скорость детонации составного заряда ВВ.

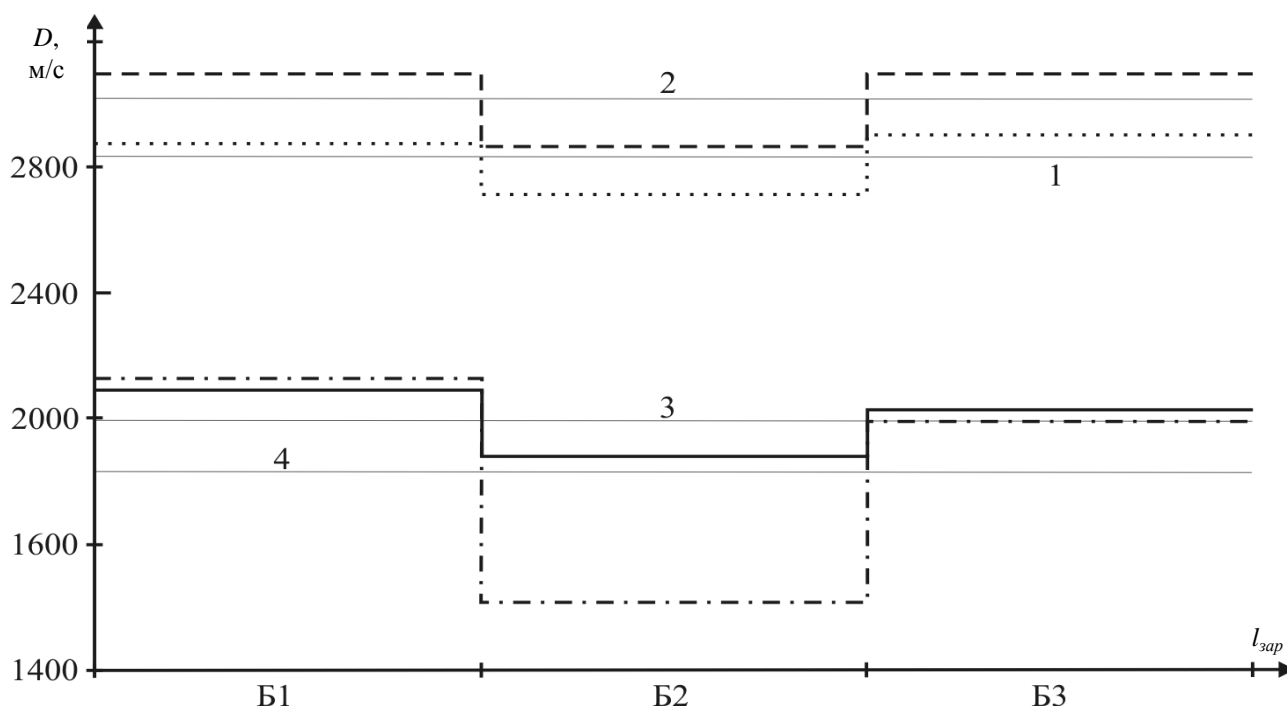


Рис. 3. Скорость детонации ВВ по базам измерения:

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

#### ЛИТЕРАТУРА

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. – С.159-165.

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

#### LITERATURE

3. Kalyakin S.A. Researching of non-ideal regimes of detonation of industrial explosives/ Kalyakin S.A., Labinskiy K.N. // Reporter of KDPU of M. Ostrogradskiy. Issue 6 / 2009. P.1. – Kremenchug, 2009. – P.159-165.

4. Labinskiy K.N. Researching of stability of non-stationary detonation of blast-hole charges // Materials of international conference «Forum of miners- 2010». – D.: National Mine University, 2010. – P.183-188.