

REFERENCES

1. Vorobyov V.V., Pejev A.M. Perspective ways of increasing the efficiency of rock explosive destruction // The collection «Up-to-date resource – and energy - saving technologies in mining industry». Research and production journal: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy State University. – Kremenchuk: KSU, 2010. – Issue 1/2010(5). – PP. 19–21. [in Russian]
2. Analysis of existing models of destruction of rocks in explosion / A.M. Pejev, S.M. Myslitskiy, A.V. Vorobyov // Nauka i studia. – Przemysl, 2011. – NR 14 (45) 2011. – PP. 40–46. [in English]
3. Bozhydaryk V.V., Sulym G.T. Elements of the theory of elasticity. – Lviv: Svit, 1994. – 560 p. [in Ukrainian]
4. Vorobyov V.V., Slavko G.V., Pejev A.M. Theoretical analysis of the influence of the method of initiation of downhole charge on value of the medium radial displacements in the area of regales // Transactions of Kremenchuk State Polytechnic University: Proceedings KSPU. – Kremenchuk: KSPU, 2005. – Iss. 1/2005 (30). – PP. 99–102. [in Russian]
5. Prokopenko V.S. On the action of explosives during the transitional mode of detonation // Information Bulletin of the Ukrainian Union Engineers on Explosives. – Kriviy Rig, 2009. – № 3. – PP. 12–17. [in Russian]

Стаття надійшла 15.04.2013.

УДК 622.235.53

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДА  
ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА И УДАРНОЙ АДИАБАТЫ  
РАЗРУШАЕМОГО ВЗРЫВОМ ПЕСЧАНИКА НА ПАРАМЕТРЫ  
ВЗРЫВНЫХ РАБОТ**

**К. Н. Лабинский, С. А. Калякин**

Донецкий национальный технический университет

ул. Артема, 58, 83001, г. Донецк, Украина. E-mail: bootor@gmail.com

Приведены результаты исследования влияния параметров детонации заряда взрывчатого вещества на скорость ударной волны во выбросоопасном песчанике. Определена ударная адиабата выбросоопасного песчаника. Установлена зависимость между относительной скоростью ударной волны в песчанике и плотностью песчаника, массой и плотностью патронирования заряда взрывчатого вещества и относительным удалением от центра приведенного заряда взрывчатого вещества. Обосновано среднее расстояние между шпурами во выбросоопасном песчанике с учетом максимального радиуса разрушения горной породы под действием ударной волны, образованной взрывом шпурового заряда взрывчатого вещества.

**Ключевые слова:** скорость детонации, ударная волна, ударная адиабата, радиус разрушения.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ДЕТОНАЦІЇ ЗАРЯДУ  
ВИБУХОВОЇ РЕЧОВИНИ ТА УДАРНОЇ АДІАБАТИ ПІСКОВИКА,  
ЩО РУЙНУЄТЬСЯ ВИБУХОМ, НА ПАРАМЕТРИ ВИБУХОВИХ РОБІТ**

**К. М. Лабінський, С. О. Калякін**

Донецький національний технічний університет

вул. Артема, 58, 83001, м. Донецьк, Україна. E-mail: bootor@gmail.com

Наведені результати дослідження впливу параметрів детонації заряду вибухової речовини на швидкість ударної хвилі у викидонебезпечному пісковіку. Встановлена ударна адіабата викидонебезпечного пісковіку. Встановлена залежність між відносною швидкістю ударної хвилі у пісковіку та щільністю пісковіку, масою та щільністю патронування заряду вибухової речовини та відносним віддаленням від центру приведенного заряду вибухової речовини. Обґрунтована відстань між шпурами у викидонебезпечному пісковіку з урахуванням максимального радіуса руйнування гірської породи під впливом ударної хвилі, що утворена вибухом шпурового заряду вибухової речовини.

**Ключові слова:** швидкість детонації ударна хвиля, ударна адіабата, радіус руйнування.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Развитие горных работ приводит к постоянному увеличению глубины разработки месторождений полезных ископаемых. В результате чего возрастает горное давление и его проявление в горных породах связано с перераспределением напряжений в призабойном объеме разрушаемого взрывом горного массива при проведении выработок. Это приводит к изменению прочностных свойств горных пород, их саморазрушению в зонах отжима и, наоборот, к упрочнению в зонах повышенного горного давления, что необходимо учитывать при выборе параметров взрывных работ и соответствующих взрывчатых веществ (ВВ).

Анализ последних исследований и публикаций показал, что разрушение горных пород при взрыве зарядов ВВ связано с распространением в массиве ударных волн и волн напряжений, возникающих на контакте раздела породы и полости выработки. Известно, что за фронтом ударной волны, распространяющейся по горному массиву после взрыва заряда ВВ, движется поток частиц породы со скоростью  $u$ . При этом разрушение горной породы происходит в том случае, если скорость потока частиц за фронтом ударной волны превышает некоторую критическую скорость, определяемую прочностью породы. Взаимосвязь скорости ударной волны и массовой скорости потока частиц описывается уравнением ударной адиабаты горной породы. Поэтому, учитывая изменение свойств пород в призабойном разрушаемом горном массиве выработки, необходимо определение ударной адиабаты разрушаемых взрывом пород как фактора, влияющего на параметры взрывных работ и схему расположения шпуровых зарядов ВВ.

Цель работы – исследование влияния детонационных характеристик заряда ВВ на скорость распространения ударной волны в разрушаемом выбросоопасном песчанике с учетом его ударной адиабаты и прочностных свойств.

## ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для достижения поставленной цели необходимо определить ударную адиабату песчаника и скорость затухания в нем ударной волны. Это позволит оценить объем разрушения песчаника ударной волной по мере удаления от заряда ВВ.

Для решения научных и инженерных задач, связанных с разрушением горных пород взрывом, требуются уравнение сжимаемости и уравнение состояния вещества. Необходимо также знать тот диапазон давлений, в пределах которого невелики повышение энтропии на фронте ударной волны и разница между напряжениями ( $\sigma_x$ ;  $\sigma_y$ ;  $\sigma_z$ ) в разных направлениях, что позволяет упростить решение ряда механических задач, связанных с динамическим нагружением. В этом случае выполняются условия  $\sigma_x \approx \sigma_y \approx \sigma_z = -P$ .

Для определения динамической сжимаемости  $P = P(\rho)$  используются уравнения сохранения массы и импульса во фронте ударной волны:

$$\begin{aligned}\rho_0 D &= \rho(V - u), \\ P - P_0 &= \rho_0 V u,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\rho_0$  – начальная плотность вещества;  $\rho$  – плотность вещества во фронте ударной волны;  $V$  – скорость ударной волны;  $u$  – скорость частиц во фронте ударной волны;  $P_0$  – давление перед фронтом ударной волны;  $P$  – давление во фронте ударной волны.

Поскольку при взрывном разрушении горных пород давление во фронте детонации может достигать десятков ГПа, то начальным атмосферным давлением можно пренебрегать по сравнению с давлением во фронте ударной волны.

Уравнения (1) позволяют получить динамическую сжимаемость горной породы в виде  $P = P(\rho)$ , если экспериментально определены скорость ударной волны  $V$  и скорость частиц в ее фронте  $u$ .

Как известно из [1], геометрическое место точек возможных начальных состояний в горной породе на границе раздела ее с ВВ можно определить, зная начальные параметры детонационной волны:

$$u = \frac{D}{n+1} \left[ 1 + \frac{2n}{n+1} \left( 1 - \left( \frac{P}{P_n} \right)^{n-1/2n} \right) \right], \quad (2)$$

где  $D$  – скорость детонации ВВ;  $n$  – показатель политропы ВВ;  $P$  – начальное давление во фронте ударной волны в среде;  $P_n$  – давление во фронте детонации;  $\rho_{ВВ}$  – начальная плотность ВВ.

С другой стороны, зависимость между давлением и скоростью частиц за фронтом ударной волны определяется выражением

$$P = \rho_0 V u. \quad (3)$$

Измерив скорость ударной волны в горной породе, продуцируемой взрывом заряда ВВ, можно теоретически найти давление во фронте ударной волны и скорость частиц, решив систему, состоящую из уравнений (2) и (3).

## ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Это проще всего осуществить графоаналитическим методом. По уравнению (2) можно построить геометрическое место точек возможных состояний в среде в соответствии с начальными параметрами детонационной волны для каждого из ВВ. По уравнению (3) можно построить геометрическое место точек возможных состояний в среде в соответствии с измеренной скоростью ударной волны. Пересечение этих зависимостей на графике будет однозначно определять начальное давление и начальную скорость движения границы раздела сред, генерируемую ВВ.

Схема графоаналитического решения системы уравнений (2) и (3) показана на рис. 1.

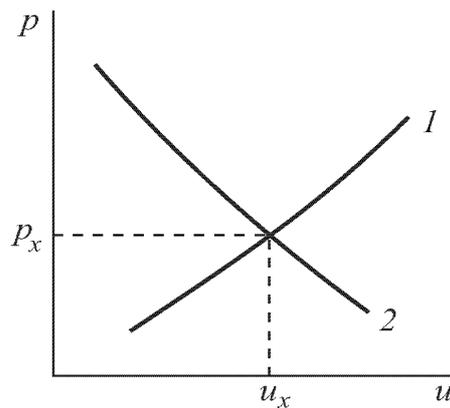


Рисунок 1 – Графоаналитический способ определения начальных параметров ударной волны в воде: 1 – ударная адиабата горной породы; 2 – волна разрежения в продуктах взрыва

Для большинства сред в широком диапазоне давлений зависимость между скоростью ударной волны и массовой скоростью имеет вид:

$$V = A + Bu, \quad (4)$$

где  $A$  и  $B$  – безразмерные коэффициенты, определяемые из опыта.

Подставляя (4) в (3), получим:

$$P = \rho_0(A + Bu)u. \quad (5)$$

Как видим, уравнение (5) – полином второй степени.

Таким образом, для определения ударной адиабаты любой горной породы достаточно определить хотя бы два значения массовых скоростей и соответствующих им давлений во фронте ударной волны, продуцируемых различными ВВ, что позволит с учетом нулевой точки определить коэффициенты  $A$  и  $B$ .

В буровзрывной лаборатории ДонНТУ при проведении опытов измерялась скорость распространения ударной волны, продуцируемой взрывом различных ВВ, в образцах выбросоопасного песчаника с горизонта 1400 м шахты им. А.А. Скочинского для определения его ударной адиабаты. Схема измерения скорости детонации ВВ и скорости ударной волны в образцах песчаника приведена на рис. 2.

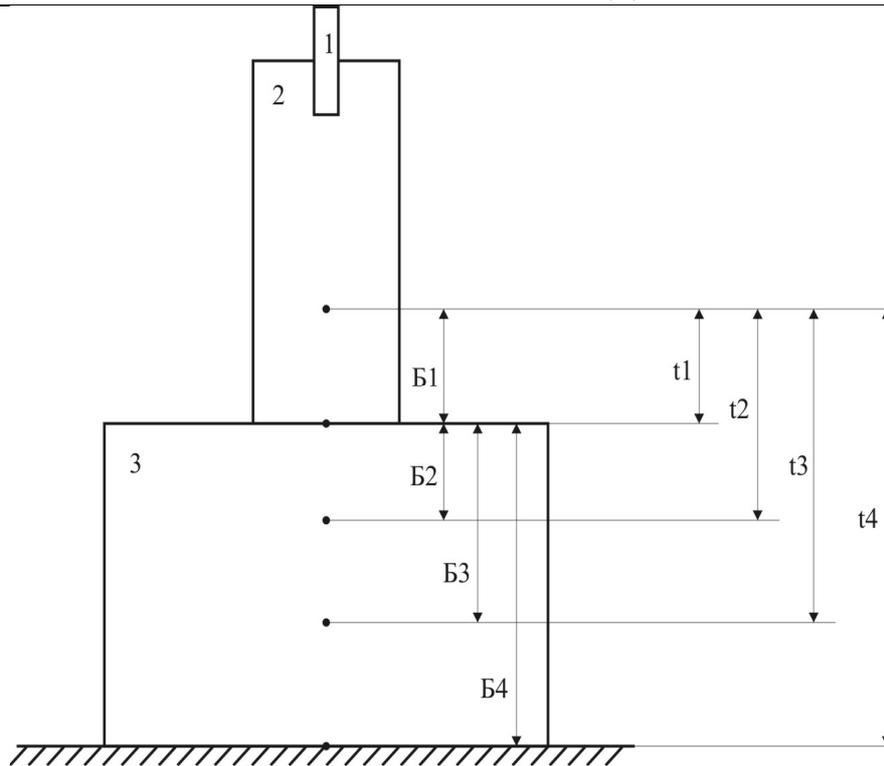


Рисунок 2 – Схема определения скорости детонации ВВ и скорости распространения ударной волны в исследуемом образце: 1 – электродетонатор; 2 – ВВ; 3 – испытуемый образец; Б1...Б4 – базы измерения скоростей между соответствующими датчиками; t1..t4 – время между срабатыванием соответствующих датчиков

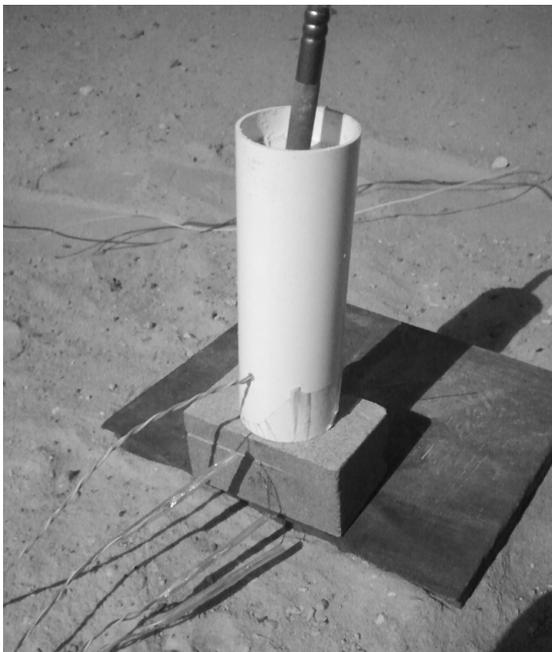


Рисунок 3 – Схема замера скорости детонации ВВ и скорости распространения ударной волны в песчанике

При проведении измерений использовался измеритель интервалов времени ИИВ-16/496 УХЛ 4.2 (ТУУ 33.5-3169501990-001:2011). В заряде ВВ и в испытуемых образцах породы устанавливались ионизационные датчики. Фото схемы представлено на рис. 3.

На жесткое горизонтальное основание устанавливались образцы испытуемой горной породы, в которой размещались ионизационные датчики, а сверху устанавливался заряд ВВ. Все используемые ВВ патронировались в заряды, имеющие оболочку из полихлорвинила с внутренним диаметром 34 мм и с толщиной стенок 1,5 мм, масса зарядов составляла 0,1 кг, плотность патронирования ВВ – 1100 кг/м<sup>3</sup>. Инициирование заряда ВВ осуществлялось детонатором ЭДКЗ-0П.

**ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ**

Результаты измерения скорости ударной волны в песчанике в зависимости от используемых зарядов из различных ВВ представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерения скорости детонации ВВ и скорости ударной волны в песчанике

ВВ	Скорость детонации $D$ , м/с	$R/r$	Скорость УВ $V$ , м/с
Аммонит БЖВ	4651,2	1,000	4741,9
	4301,1	1,645	4114,3
	4301,1	2,649	3006,7
	4651,2	1,717	3902,4
	4651,2	2,775	2968,6
	4395,6	2,022	3590,6
	4395,6	2,757	2624,0
Аммонит ПЖВ20	3883,5	1,000	4186,0
	3883,5	1,717	3636,4
	3883,5	2,577	2976,7
Опытный образец ВВ IV класса	3703,7	1,000	4050,7
	3703,7	1,538	3871,0
	3703,7	2,900	3415,7
Опытный образец ВВ V класса	2131,4	1,000	3507,8
	2131,4	1,574	3240,5
	2131,4	2,183	2956,5

Относительное расстояние  $R/r$  от центра заряда ВВ до точки измерения определялось по следующей формуле:

$$R/r = \frac{B_i + r}{r},$$

где  $B_i$  – база измерения в песчанике  $B_2 \dots B_4$ , м (рис. 2);  $r$  – приведенный радиус заряда, м:  $r = \sqrt[3]{\frac{3m_{ВВ}}{4\pi\rho_{ВВ}}}$ ,  $m_{ВВ}$  – масса заряда ВВ, кг;  $\rho_{ВВ}$  – плотность патронирования ВВ, кг/м<sup>3</sup>.

Исследования показали, что при небольших массах заряда ВВ по мере удаления от границы раздела «ВВ–горная порода» наблюдается затухание скорости ударной волны, которое можно описать линейной зависимостью с величиной достоверности аппроксимации равной коэффициенту парной корреляции  $R^2 > 0,9$ . Это позволяет с достаточной точностью определить начальную скорость ударной волны на границе раздела сред. Результаты скорости детонации различных ВВ и соответствующих начальных ударных волн в песчанике, рассчитанных согласно системы уравнений (2) и (3), и значения  $P$  и  $u$  представлены в табл. 2.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Таблица 2 – Средние экспериментальные и расчетные значения параметров  
детонации ВВ и ударной волны в песчанике

Параметры заряда ВВ					Параметры песчаника			
ВВ	n	D, м/с	$\rho_{ВВ}, \text{кг/м}^3$	$P_n, \text{МПа}$	$\rho_n, \text{кг/м}^3$	V, м/с	P, МПа	u, м/с
Аммонит № 6ЖВ	2,17	4311,6	1100	6441,1	2860	4683,3	9899,8	739,1
Аммонит ПЖВ20	2,97	3869,3	1100	4145,4	2860	4186,0	6340,0	529,6
Опытн. обр. ВВ IV кл.	3,10	3721,3	1100	3712,9	2860	4050,7	5687,3	490,9
Опытн. обр. ВВ V кл.	3,11	2131,4	1100	1216,9	2860	3507,8	2096,6	209,0

По полученным экспериментальным результатам методом наименьших квадратов были определены эмпирические коэффициенты ударной адиабаты А и В уравнения (5) для исследуемого песчаника:

$$P = 2,86(2928 + 2,365 u)u .$$

Анализ результатов расчетов и измерений позволил установить взаимосвязь между относительной скоростью ударной волны в песчанике (скорость ударной волны V, отнесенная к коэффициенту А ударной адиабаты песчаника), его плотностью, скоростью детонации ВВ и плотностью патронирования ВВ в заряде. Все переменные факторы объединены в параметр  $\Pi_D = \rho_{ВВ} \cdot D_{ВВ} / (\rho_n \cdot R/r)$ . Результаты расчета значений относительной скорости ударной волны в песчанике и соответствующих им значений параметра  $\Pi_D$  приведены в табл. 3.

С достаточной точностью взаимосвязь относительной скорости ударной волны описывается логарифмической зависимостью от параметра  $\Pi_D$  (см. рис. 4):

$$V/A = 0,3978 \ln(\Pi_D) - 1,4485. \quad (6)$$

Учитывая характер распространения ударной волны, описываемый зависимостью (6), можно для выбросоопасного песчаника определить критическую скорость движения частиц во фронте волны u, превышение которой будет приводить к разрушению породы. По результатам лабораторных и теоретических исследований в работе [2] было установлено, что критическая скорость движения частиц за фронтом ударной волны для песчаника в зависимости от его откольной прочности равна  $u \approx 1.0 \dots 1.25$  м/с. Это позволяет нам исходя из уравнения ударной адиабаты песчаника определить минимальную скорость распространения ударной волны, приводящую к его разрушению:

$$D_{\min} = A + B u_{\text{кр}} = 2928 + 2,365 \cdot 1,25 = 2931,0 \text{ м/с}. \quad (7)$$

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Таблица 3 – Результаты расчета относительной скорости ударной волны  
V/A и показателя  $\Pi_D$

ВВ	V, м/с	V/A	R/r	$\Pi_D$
Аммонит 6ЖВ	4741.9	1.620	1.000	1788.923
	4114.3	1.405	1.645	1005.447
	3006.7	1.027	2.649	624.461
	3902.4	1.333	1.717	1041.884
	2968.6	1.014	2.775	644.751
	3590.6	1.226	2.022	836.220
	2624.0	0.896	2.757	613.282
Аммонит ПЖВ20	4186.0	1.430	1.000	1493.654
	3636.4	1.242	1.717	869.917
	2976.7	1.017	2.577	579.516
Опытный образец ВВ IV класса	4050.7	1.383	1.000	1424.500
	3871.0	1.322	1.538	926.350
	3415.7	1.167	2.900	491.195
Опытный образец ВВ V класса	3507.8	1.198	1.000	819.769
	3240.5	1.107	1.574	520.949
	2956.5	1.010	2.183	375.513

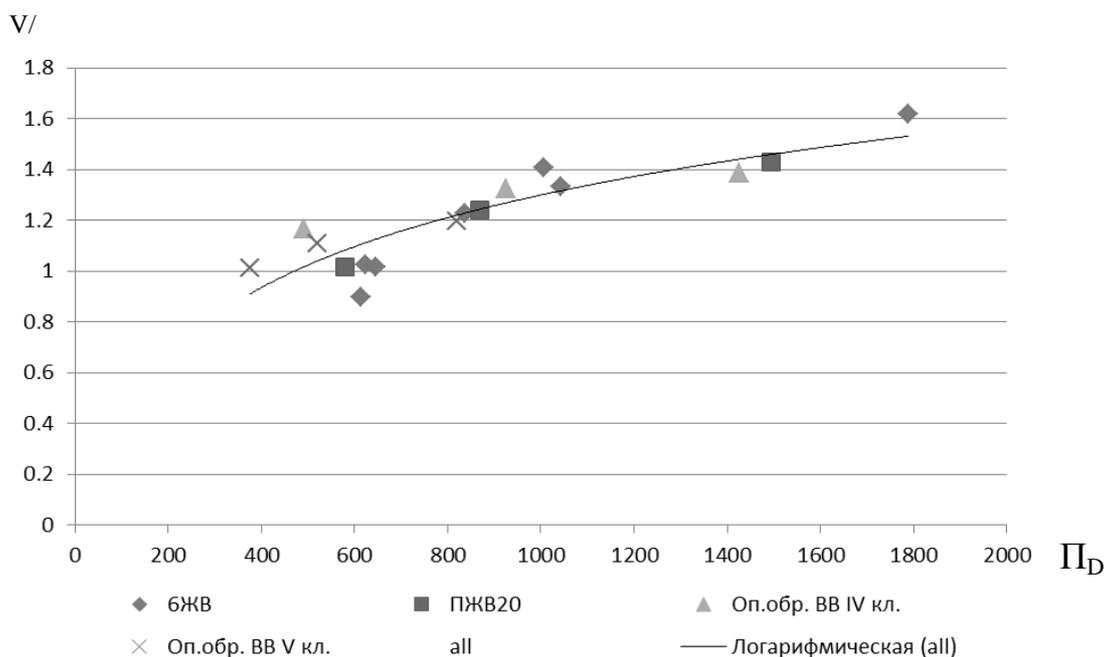


Рисунок 4 – Расчетные данные и зависимость  $V/A=f(\Pi_D)$

Определив минимальную скорость ударной волны, обеспечивающую разрушение горной породы, мы можем определить радиус разрушения песчаника ударной волной вокруг заряда ВВ, для этого подставим (7) в (6) и сделаем следующие преобразования:

$$0.3978 \ln \left( \frac{\rho_{BB} D_{BB}}{\rho_n \frac{R}{r}} \right) - 1.4485 \geq 1.001,$$

$$\ln \left( \frac{r \rho_{BB} D_{BB}}{\rho_n} \right) - \ln(R) \geq 6.1576,$$

$$\ln(R) \leq \ln \left( \frac{r \rho_{BB} D_{BB}}{\rho_n} \right) - 6.1576,$$

$$\ln(R) \leq \ln \left( \frac{r \rho_{BB} D_{BB}}{\rho_n} \right) - \ln(e^{6.1576}),$$

$$\ln(R) \leq \ln \left( \frac{r \rho_{BB} D_{BB}}{\rho_n e^{6.1576}} \right),$$

$$R \leq \frac{r \rho_{BB} D_{BB}}{\rho_n e^{6.1576}},$$

$$R \leq \frac{D_{BB}}{\rho_n e^{6.1576}} \sqrt[3]{\frac{3m_{BB}\rho_{BB}^2}{4\pi}},$$

окончательно получим:

$$R \leq \frac{0.00357 D_{BB}}{\rho_n} \sqrt[3]{m_{BB} \rho_{BB}^2}. \quad (8)$$

Таким образом, получена зависимость (8), позволяющая определить максимальный радиус разрушения песчаника ударной волной в зависимости от массы заряда ВВ, плотности его патронирования и скорости детонации.

Поскольку схему расположения шпуров при взрывных работах выбирают так, чтобы объемы разрушения пород вокруг смежных шпуров как минимум соприкасались, то для смежных шпуровых зарядов можно записать уравнение для расчета расстояния между шпурами:

$$a_{cp} = 2R \leq \frac{0.00714 \cdot D_{BB}}{\rho_n} \sqrt[3]{m_{BB} \rho_{BB}^2}, \text{ м.} \quad (9)$$

Следовательно, среднее расстояние между шпурами необходимо определять исходя из радиусов разрушения зарядом ВВ соответствующей горной породы. Это позволит с учетом параметров детонации ВВ и конструкции шпурового заряда, а также ударной адиабаты породы обеспечить оптимальное расположение шпуров по сечению забоя горной выработки и оптимизировать параметры взрывных работ и объемов бурения.

## ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

**ВЫВОДЫ.** 1. В результате теоретических и лабораторных исследований определена ударная адиабата выбросоопасного песчаника гор. 1400 м шахты им. А.А. Скочинского.

2. Установлена взаимосвязь между относительной скоростью ударной волны в песчанике от скорости детонации ВВ, плотности песчаника, его критической массовой скорости во фронте ударной волны и удаления от центра заряда.

3. Обосновано среднее расстояние между шпурами в выбросоопасном песчанике с учетом максимального радиуса разрушения горной породы под действием ударной волны, образованной взрывом шпурового заряда ВВ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. – М.: Физматлит, 2004. – Т. 2. – 656 с.

2. Современные проблемы разрушения горных пород взрывом / С.А. Калякин, К.Н. Лабинский // Перспективы развития Восточного Донбасса. Часть 1: Сбор. науч. трудов. – Новочеркасск: Шахтинский ин-т ЮРГТУ (НПИ), 2008. – С. 348–361.

### **RESEARCHING OF INFLUENCE OF DETONATION PARAMETERS OF EXPLOSION CHARGE AND SHOCK ADIABAT OF OUTBURST- SANDSTONE, WHICH IS DESTROYED WITH THE EXPLOSION, ON THE PARAMETERS OF EXPLOSIVE WORKS**

**K. Labinskiy, S. Kalyakin**

Donetsk state technical university

vul. Artyoma, 58, 83001, Donetsk, Ukraine. E-mail: bootor@gmail.com

The results of researching of influence of detonation' parameters of explosion charge on shock wave speed in outburst-sandstone are submitted in this article. The shock adiabat of outburst-sandstone is determined. The dependence between relative speed of shock wave in outburst-sandstone and density of outburst-sandstone, density and weight of explosive, and relative distance from center of coerced explosive is established. The distance between blast-holes in outburst-sandstone taking into account maximum radius of destruction of mine rock influenced shock wave from explosive of explosion charge is grounded.

**Key words:** detonation speed, shock wave speed, shock adiabat, radius of destruction.

### REFERENCES

1. Physics of explosion / Under the redaction of K.P. Staniukovich. – М.: Fizmatlit, 2004. – Vol. 2. – 656 p. [in Russian]

2. Modern principles of destroying of mine rocks with the explosion / S.A. Kalyakin, k.n. Labinskiy // Perspectives of development of eastern Donbass. Part1: Comp. Of science works. – Novocherkassk: Shakhty' institute URGTU (NPI), 2008. – PP. 348–361. [in Russian]

Стаття надійшла 24.04.2013.