

Лабинский К.Н. (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет, Донецк

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УДАРНОЙ АДИАБАТЫ ГОРНЫХ ПОРОД НА РАЗРУШЕНИЕ ИХ ВЗРЫВОМ ШПУРОВОГО ЗАРЯДА ВВ

В статье приведены результаты исследования влияния параметров детонации заряда ВВ на скорость ударной волны в горных породах. Установлена зависимость относительного радиуса разрушения от свойств ВВ и горных пород. Обосновано среднее расстояние между шпурами с учетом максимального радиуса разрушения горной породы под действием ударной волны, образованной взрывом шпурового заряда ВВ.

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

### Введение.

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 разрушаемой горной породе с учетом ее ударной адиабаты и прочностных свойств. Для достижения поставленной цели необходимо определить ударную адиабату горных пород и скорость затухания в них ударной волны. Это позволит оценить объем разрушения породы ударной волной по мере удаления от заряда ВВ.

### Материалы и результаты исследований и их обсуждение.

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:

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

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:

$$P = \rho_0 V u \quad (2)$$

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 (1) и (2).

Решить систему уравнений (1) и (2) проще всего графоаналитическим методом. По уравнению (1) можно построить геометрическое место точек возможных состояний в среде в соответствии с начальными параметрами детонационной волны для каждого из ВВ. По уравнению (2) 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 (1) и (2) показана на рис. 1.

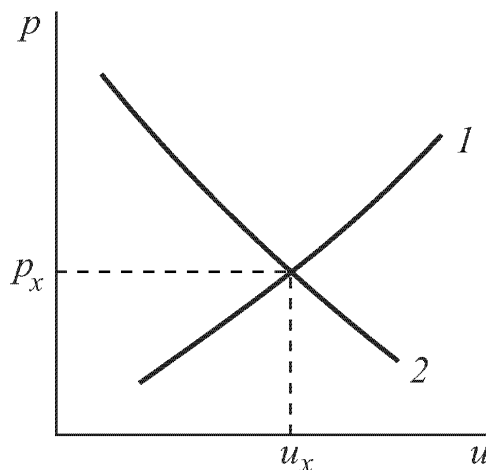


Рис. 1. Графоаналитический способ определения начальных параметров ударной волны в воде  
1 — ударная адиабата горной породы, 2 — волна разрежения в продуктах взрыва

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

$$V = A + Bu, \quad (3)$$

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

Подставляя (3) в (2), получим:

$$P = \rho_0 (A + Bu) u \quad (4)$$

Как видим, уравнение (4) — 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 горных пород с горизонта 1400 м ш. 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.

При проведении измерений использовался измеритель интервалов времени ИИВ-16/496 УХЛ 4.2 (ТУУ 33.5-3169501990-001:2011). 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 ПХВ с внутренним диаметром 34 мм и с толщиной стенок 1,5 мм, масса зарядов составляла 100 г., плотность патронирования ВВ —  $1,1 \text{ г/см}^3$ . Иницирование заряда ВВ осуществлялось детонатором ЭДКЗ-0П.

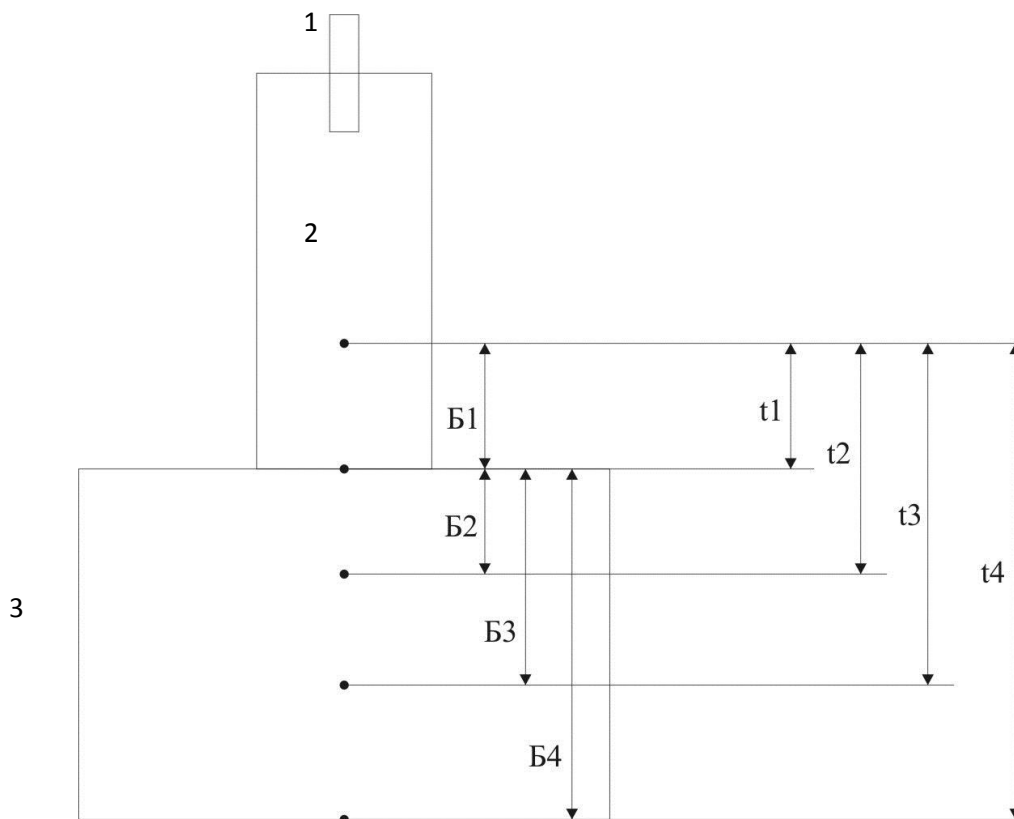


Рис. 2. Схема определения скорости детонации ВВ и скорости распространения ударной волны в исследуемом образце

1 – электродетонатор; 2 – ВВ; 3 – испытуемый образец; Б1..Б4 – базы измерения скоростей между соответствующими датчиками; t1..t4 – время между срабатыванием соответствующих датчиков

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

$$R/r = \frac{B_i + r}{r}, \quad (5)$$

где  $B_i$  – база измерения в песчанике  $B_2 \dots B_4$ , см (см. рис. 2);

$$r – \text{приведенный радиус заряда, см; } r = \sqrt[3]{\frac{3m_{ВВ}}{4\rho_{ВВ}}}$$

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 (1) и (2), и значения  $P$  и  $u$  представлены в табл. 1.

По полученным экспериментальным результатам методом наименьших квадратов были определены эмпирические коэффициенты ударной адиабаты  $A$  и  $B$  уравнения (2) для исследуемых горных пород:

- выбросоопасный песчаник:

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

- невыбросоопасный песчаник:

$$P = 2,98(2807 + 3,068u)u$$

- аргиллит:

$$P = 2,81(4123 + 1,035u)u$$

Таблица 1 - Средние экспериментальные и расчетные значения параметров детонации ВВ и ударной волны в песчанике

№ п/п	Параметры заряда ВВ					Начальные параметры УВ песчаника			
	ВВ	n	D, м/с	$\rho_{ВВ}$ , г/см <sup>3</sup>	$P_n$ , МПа	$\rho_n$ , г/см <sup>3</sup>	V, м/с	P, МПа	u, м/с
1	Аммонит №6ЖВ	2,17	4311,6	1,1	6441,1	2,86	4683,3	9899,8	739,1
2	Аммонит ПЖВ20	2,97	3869,3	1,1	4145,4	2,86	4186,0	6340,0	529,6
3	Опытн. обр. ВВ IV кл.	3,10	3721,3	1,1	3712,9	2,86	4050,7	5687,3	490,9
4	Опытн. обр. ВВ V кл.	3,11	2131,4	1,1	1216,9	2,86	3507,8	2096,6	209,0

- известняк:

$$P = 2,97(4745 + 1,672u)u$$

- уголь пласта h<sub>6</sub>:

$$P = 1,21(1673 + 0,977u)u$$

Анализ результатов расчетов и измерений позволил установить взаимосвязь между относительной скоростью ударной волны в породах (скорость ударной волны V, отнесенная к коэффициенту A ударной адиабаты породы, характеризующему скорость распространения продольной волны), его плотностью, скоростью детонации ВВ и плотностью патронирования

ВВ в заряде. Все переменные факторы объединены в параметр  $\Pi_D = \left( \frac{\rho_{ВВ} D_{ВВ}}{\rho_n A \frac{R}{r}} \right)$ . С достаточной

точностью взаимосвязь относительной скорости ударной волны описывается логарифмической зависимостью от параметра  $\Pi_D$  (см. рис. 3).

$$V/A = a * \ln(\Pi_D) + b. \quad (6)$$

Учитывая характер распространения ударной волны, описываемый зависимостью (6), можно для горных пород 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 горных пород равна  $u \approx 1.0$  м/с. Это позволяет нам определить минимальную скорость распространения ударной волны, приводящую к разрушению породы, через уравнение ударной адиабаты.

Как видно из рисунка (3), все зависимости сходятся в одной точке, что позволяет, используя уравнение (6), определить относительный радиус разрушения горной породы в зависимости от свойств ВВ и уравнения ударной адиабаты:

$$0,9 = 0,262 * \ln(\Pi_D) + 1,5669;$$

$$\ln(\Pi_D) = (0,9 - 1,5669) / 0,262;$$

$$\Pi_D = 0,07844$$

окончательно получим:

$$\frac{R}{r} = \frac{12,748 \rho_{ВВ} D_{ВВ}}{\rho_n A}. \quad (7)$$

Учитывая то, что в формировании сферической ударной волны принимает участие не весь удлиненный заряд, а только его часть, можем определить радиус разрушения вокруг шпурового заряда ВВ в зависимости от диаметра патронов ВВ:

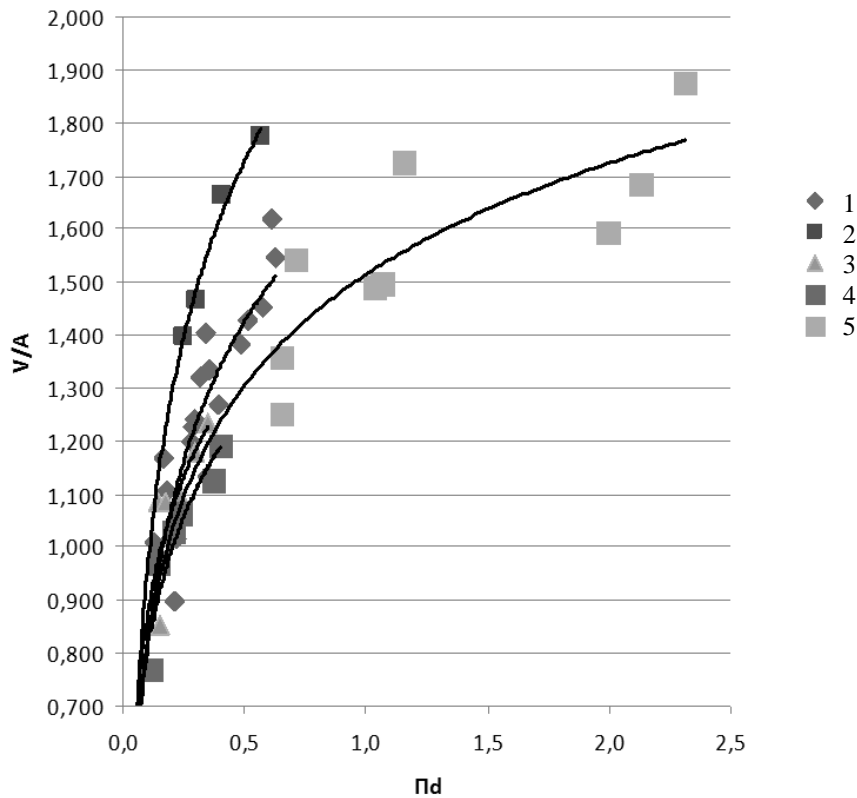


Рис. 3. Расчетные данные и зависимости  $V/A=f(Pd)$

1 – выбросоопасный песчаник; 2 – невыбросоопасный песчаник; 3 – известняк; 4 – аргиллит; 5 – уголь

$$R = \sqrt{\frac{d^2 \left( \frac{12,748 \rho_{BB} D_{BB}}{\rho_n A} \right)^3}{8}} \quad (8)$$

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 соседних шпуров как минимум соприкасались, то для смежных шпуровых зарядов можно записать уравнение для расчета расстояния между шпурами:

$$a_{cp} = \sqrt{\frac{d^2 \left( \frac{12,748 \rho_{BB} D_{BB}}{\rho_n A} \right)^3}{2}} \quad (9)$$

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.

#### Выводы.

В результате теоретических и лабораторных исследований определены ударные адиабаты горных пород гор. 1400 м шахты им. А.А. Скочинского. Установлена взаимосвязь между относительной скоростью ударной волны в них от скорости детонации ВВ, плотности патронирования ВВ, плотности породы, коэффициента А уравнения ударной адиабаты и удаления от центра заряда.

Обосновано среднее расстояние между шпурами в горной породе с учетом максимального радиуса ее разрушения под действием ударной волны, образованной взрывом шпурового заряда ВВ.

## Библиографический список

1. Физика взрыва // Под ред. К.П Станюковича.– М.: Физматлит, 2004.– Т.2.– 656 С.
2. Калякин С.А. Современные проблемы разрушения горных пород взрывом / С.А. Калякин, К.Н. Лабинский / Перспективы развития Восточного Донбасса. Часть 1: Сб. науч. тр. Шахтинский ин-т ЮРГТУ (НПИ). - Новочеркасск, 2008. – С. 348-361

*Надійшла до редколегії \_\_.\_\_.2013*

Лабінський К.М.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УДАРНОЇ АДІАБАТИ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА РУЙНУВАННЯ ЇХ ВИБУХОМ ШПУРОВОГО ЗАРЯДУ ВР

У статті наведені результати дослідження впливу параметрів детонації заряду ВР на швидкість розповсюдження ударної хвилі у гірських породах. Встановлена залежність відносного радіусу руйнування від властивостей ВР та гірських порід. Обґрунтована середня відстань між шпурами з урахуванням максимального радіусу руйнування гірської породи під дією ударної хвилі, що утворена вибухом шпурового заряду ВР.

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

K. Labinskiy

### RESEARCHING OF INFLUENCE OF SHOCK ADIABAT OF MINE ROCKS ON DESTROYING WITH THE EXPLOSION OF BLAST-HOLE CHARGE

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

Keywords: detonation speed, shock wave speed, shock adiabata, radius of destruction.