

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАСШИРЕНИЯ
ЗАРЯДНОЙ ПОЛОСТИ СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА**

В. П. Куринной, И. П. Гаркуша

ГВУЗ «Национальный горный университет»

просп. Д. Яворницкого, 19, г. Днепр, 49600, Украина.

E-mail: nmu@nmu.org.ua

В. А. Никифорова

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ул. Симферопольская, 2-А, г. Днепр, 49005, Украина.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Рассмотрены процессы, протекающие в зарядной полости и окружающей ее твердой среде (породе) на начальной стадии расширения полости взрыва скважинного заряда, которые в конечном счете определяют эффективность его разрушающего действия. Установлено, что основным механизмом разрушения в зоне мелкодисперсного дробления является мгновенное разрушение породы под действием сдвиговых напряжений. Размер частиц, на которые разрушается порода обратно пропорционален ширине зоны химической реакции во взрывном веществе. Установлено, что чем больше амплитуда напряжений в волне сжатия, неоднородность и скорость изменения поля напряжений, тем меньше размер частиц, на которые разрушается порода.

Ключевые слова: взрыв, зона мелкодисперсного разрушения, ударные волны, волны сжатия.

**ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ
НА ПОЧАТКОВІЙ СТАДІЇ РОЗШИРЕННЯ
ЗАРЯДНОЇ ПОРОЖНИНИ СВЕРДЛОВИННОГО ЗАРЯДУ**

В. П. Куринний, І. П. Гаркуша

ДВНЗ «Національний гірничий університет»

просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49600, Україна.

E-mail: nmu@nmu.org.ua

В. А. Никифорова

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

вул. Сімферопольська, 2- А, м. Дніпро, 49005, Україна.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Розглянуто процеси, що протікають у зарядній порожнині і оточуючому її твердому середовищі (породі) на початковій стадії розширення порожнини вибуху свердловинного заряду, які в остаточному підсумку визначають ефективність його руйнуючої дії. Встановлено, що основним механізмом руйнування в зоні дрібнодисперсного дроблення є миттєве руйнування породи під дією зсувних напружень. Розмір частинок, на які руйнується порода обернено пропорційний ширині зони хімічної реакції у вибуховій речовині. Встановлено, що чим бі-

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

льше амплітуда напружень у хвилі стиснення, неоднорідність і швидкість зміни поля напружень, тим менший розмір частинок, на які руйнується порода.

Ключові слова: вибух, зона дрібнодисперсного руйнування, ударні хвилі, хвилі стиснення.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. На бризантное разрушение горной породы в ближней зоне взрыва на контакте со взрывчатом веществом (ВВ) затрачивается более 90 % заключенной в нем энергии. На контакте ВВ с породой скачок давления, преодолевая сопротивление породы всестороннему сжатию, производит раздавливание и измельчение породы, увеличивая размеры зарядной полости. После начального увеличения объема зарядной полости давление продуктов детонации (ПД) снижается, но остается еще достаточно высоким и действует на стенки увеличенной полости и образованных волной трещин.

Снижая затраты энергии на измельчение в ближней зоне взрыва, можно перераспределить ее на весь объем разрушения и таким образом повысить эффективность взрывного разрушения. Поэтому важно рассмотреть процессы, протекающие в зарядной полости и в породе в первые 300 мкс после прохождения детонационной волной данного сечения скважины [1–6]. Кроме того, недостаточно изучены процессы образования и распространения ударных волн (УВ) и волн сжатия (ВС) в горных породах. Поэтому, рассмотрение процессов, протекающих в ближней зоне взрыва на его начальной стадии и численная оценка характеризующих их параметров представляется актуальным.

Цель данной статьи – теоретические исследования процессов, протекающих на начальной стадии расширения полости взрыва скважинного заряда.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Отличие ударной волны от сильной волны сжатия заключается в наличии ударного скачка, при котором на промежутке примерно 1 нм давление возрастает до давления в ударной волне. Кроме того, вещество за фронтом плоской ударной волны движется с одинаковой массовой скоростью, а скорость смещения частиц среды в волне сжатия убывает от максимальной до нуля во фронте волны. Можно утверждать, что если за фронтом волны скальная порода разрушается на частицы размером более 0,1 мм, то эта волна не ударная.

Увеличенный размер частиц указан потому, что давление в затухающей ударной волне меньше давления p_s , необходимого для ее возникновения. В этом случае порода разрушается за счет своей кинетической энергии и ширина фронта волны возрастает.

Для возникновения в породе ударной волны необходимо давление p_s на ее фронте, которое может быть рассчитано по формуле

$$p_s = \frac{2\rho_0 c_l^2}{m+1}, \quad (1)$$

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

где ρ_0 и c_l – соответственно плотность и скорость продольных волн в невозмущенной породе; m – коэффициент ударной сжимаемости породы в уравнении Гэта [7].

Ударная волна генерируется при давлениях $p > p_s$. Когда давление, вызывающее ударную волну уменьшается, давление на ее фронте становится меньше p_s . При снижении давления в полости взрыва некоторое время ударная волна еще продолжает распространяться за счет кинетической энергии вещества породы за ее фронтом. Когда давление на фронте ударной волны достигает предела динамической прочности породы, она вырождается в волну напряжений.

Известны экспериментальные данные, свидетельствующие, что в граните ($\rho_0 = 2610 \text{ кг/м}^3$, $c_l = 5870 \text{ м/с}$, $m = 4$) ударная волна образуется при давлении $p_s > 33 \text{ ГПа}$. При $p_s \leq 33 \text{ ГПа}$ фиксировались только упругие волны со скоростью c_l .

Формула (1) дает в граните значение $p_s = 35,97 \text{ ГПа}$. Различие экспериментального и теоретического значений давления p_s объясняется тем, что ударная волна возникает лишь в случае, когда скорость волны сжатия возрастает при увеличении давления в зарядной полости. Поскольку скорость волны сжатия $c_r = \sqrt{dp/d\rho}$ и если предположить, что давление и плотность породы связаны формулой Гэта [8]

$$p = A \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^m - 1 \right], \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность невозмущенной среды при атмосферном давлении, поэтому

$$c_r = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{Am}{\rho_0} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{m-1}{2}}}, \quad (3)$$

где A и m – коэффициенты в уравнении Гэта.

Из уравнения (2) имеем:

$$\frac{p}{A} + 1 = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^m \rightarrow \left(1 + \frac{p}{A} \right)^{\frac{1}{m}} = \frac{\rho}{\rho_0},$$

поэтому

$$\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{m-1}{2}} = \left(1 + \frac{p}{A} \right)^{\frac{m-1}{2m}},$$

следовательно

$$c_l = c_{l0} \left(1 + \frac{p}{A} \right)^{\frac{m-1}{2m}}, \quad (4)$$

где c_{l0} , c_l – соответственно скорости волн напряжений в породе при атмосферном давлении p_0 и давлении p .

Рассмотрим процессы разрушения породы у стенки скважины. При распространении детонационной волны в скважине в зоне химической реакции за время τ давление возрастает до величины p_d , при этом в породе возникает сильная волна сжатия со средним модулем градиента напряжений во фронте, равным

$$\left| \frac{\partial \sigma}{\partial r} \right| = \frac{p_d}{c\tau} = (3 \div 5) \cdot 10^{11} \text{ (Па/м)}, \quad (5)$$

где c – скорость сильной волны сжатия.

Градиент напряжений проводим к деформациям сдвига, параллельным фронту волны, что вызывает срез породы. Так как критические напряжения возникают на поверхности среды, то разрушение будет происходить мгновенно. Минимальный размер частиц можно оценить по формуле

$$d = \frac{\sigma_s}{(p_d / c\tau)} \leq 0,1 \text{ мм}, \quad (6)$$

где σ_s – динамический предел прочности породы на срез.

В дальнейшем размеры частиц благодаря силе трения будут возрастать.

При распространении сильной волны сжатия порода смещается в радиальных направлениях, что приводит к росту радиальных трещин, порядок величины минимального расстояния между которыми такой же, как для минимального размера частиц d .

Поскольку в скважине в плоскости, перпендикулярной ее оси, протекают сложные волновые процессы (волны разрежения и сжатия), то в породе распространяется сильная волна сжатия, которая, как правило, обгоняет детонационную волну в скважине. При этом компоненты тензора волны сжатия в породе сильно зависят от времени. Чем больше амплитуда напряжений в волне сжатия, неоднородность и скорость изменения поля напряжений, тем меньше размеры частиц, на которые разрушается порода. В ближней зоне взрыва порода разрушается не только в волне сжатия, но и в квазистатическом поле напряжений, создаваемом расширяющимися продуктами детонации. Порода разрушается в квазистатическом поле, если за время разрушения ее элемента изменение поля существенно меньше предела прочности породы. В рассматриваемой зоне порода разрушается до частиц размером меньше 1 мм. Время разрушения в этом случае равно нескольким мкс, а давление в породе изменяется за это время на

величину менше 10 МПа. Поэтому в любом достаточно сильном динамическом поле напряжений порода, начиная с какого-то элемента, разрушается в квазистатическом поле. При давлении 4–7 ГПа плотность скальной породы возрастает на 4–7 %. Если порода поликристаллическая, неоднородная по сжимаемости и прочности, то в ней возникают концентраторы напряжений, способствующие разрушению породы.

ВЫВОДЫ. Основным механизмом разрушения породы в зоне мелкодисперсного дробления является мгновенное разрушение пород под действием сдвиговых напряжений. Установлено, что чем больше амплитуда напряжений в волне сжатия, неоднородность и скорость изменения поля напряжений, тем меньше размер частиц, на которые разрушается порода. В ближней зоне взрыва порода разрушается не только в волне сжатия, но и в квазистатическом поле напряжений, создаваемом расширяющимися продуктами детонации. Порода разрушается в квазистатическом поле напряжений, если за время разрушения ее элемента изменение поля существенно меньше предела прочности породы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родин Р.А. Физическая сущность процесса разрушения хрупких горных пород // Изв. вузов. Горный журнал. – 1991. – № 11. – С. 12–20.
2. Скорости и время расширения цилиндрической взрывной полости в массиве горных пород / Б. Р. Ракшиев, З. Б. Ракшиева, А. М. Ауэзова // Взрывное дело № 111/68. – М.: МВК по ВД при АГН, 2014. – С. 3–17.
3. Одинцев В.Н. Оценка влияния давления во взрывной полости на предразрушение горных пород // Взрывное дело № 115/72. – М.: МВК по ВД при АГН, 2016. – С. 5–17.
4. Дугарцыренов А.В. К механизму разрушения упругой среды (горной породы) при взрыве сосредоточенного и удлиненного зарядов // ГИАБ. – 2008. – № 3. – С. 12–17.
5. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Критерії керованого знеміцнення гірських порід у полі напружень // Сб. научных трудов Национальной горной академии Украины. – Днепропетровск. – 1998. – Т. 4, № 3. – С. 75–78.
6. Куринной В.П., Гаркуша И.П. Об уравнении адиабаты для продуктов детонации взрывчатых веществ // «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках»: Материалы XX международной научной школы им. академика С.А. Христиановича. – Симферополь: Таврический нац. ун-т, 2012. – С. 193–196.
7. Куринной В.П., Гаркуша И.П. Определение давления, необходимого для возбуждения ударных волн в горных породах // «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках»: Материалы XX международной научной школы им. академика С.А. Христиановича. – Симферополь: Таврический нац. ун-т, 2010. – С. 196–199.
8. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3. – Т.1. – М.: Физматлит, 2002. – 832 с.

**THEORETICAL RESEARCHES OF PROCESSES
ON INITIAL STAGE OF EXPANSION CHARGE
CAVITIES HOLE OF THE CHARGE**

V. Kurinnoy, I. Garkusha

State Higher Educational Institution «National Mining University»

prosp. D. Yvornichkogo, 19, Dnipro, 49005, Ukraine.

E-mail: nmu@nmu.org.ua

V. Nikiforova

M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy
of Science of Ukraine

vul. Simpheropolskaya 2-A, Dnepr, 49005, Ukraine.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Purpose. Theoretical researches of the processes proceeding at an initial stage of a cavity explosion expansion of a charge hole. **Method.** The analytical method of researches, based on positions of physics of explosion about hisaction on a hard environment, is used. **Results.** The processes taking place in the charging cavity and the surrounding solid medium (rock) at the initial stage of the expansion of the cavity of the explosion of the borehole charge are considered, which ultimately determine the efficiency of its destructive action. It has been established that the main mechanism of destruction in the zone of finely divided crushing is the instantaneous destruction of the rock under action Shear stresses. The size of the particles to which the rock is destroyed is inversely proportional to the width of the chemical reaction zone in the explosive (substance). It is established that the greater the amplitude of the stresses in the compression wave, the inhomogeneity and rate of change of the stress field, the smaller is the size of the particles to which the rock is destroyed. **Practical value.** Job performances allow to develop the explosives with the small area of fine dispersedestruction, to ground the parameters of charges at intervals inert and water, that enables to lower the size of area of fine dispersedestruction.

Key words: explosion, area of fine disperse destruction, , shock waves, waves of compression.

REFERENCES

1. Rodin, R.A. (1991), "Physical essence of destruction process of fragile rocks", *Izv. vuzov. Gorniy gurnal*, no 11, pp. 12–20.
2. Rakshiev, B.R., Rakshieva, Z.B. and. Auezova, A.M. (2014), "Speeds and time of a cylindrical explosive cavity expansion in a file of rocks", *Vzrivnoe delo*, no 111/68, Moscow, Russia, pp. 3–17.
3. Odintsev, V.N. (2016), "The estimation of pressure influence in an explosive cavity on destruction of rocks", *Vzrivnoe delo*, no 115/72, Moscow, Russia, pp. 5–17.
4. Dugaryntsev, A.V. (2008), "To the mechanism of destruction of the elastic medium (rock) at explosion of the concentrated and extended charges", *GIAB*, no 3, pp. 12–17.

5. Garkusha, I.P. and Kurinnoy, V.P. (1998), "Criteria operated loss of strength rocks in field of pressure", *Sb. nauchnyh trudov Natsionalnoy gornoy akademii Ukrainy*, Dnepropetrovsk, Ukraine, vol. 4, no. 3, pp. 75–78.

6. Kurinnoy, V.P. and Garkusha, I.P. (2012), "About the equation of an adiabatic curve for products detonation of explosives", *Deformirovaniye I razrusheniye materialov s defektami I dinamicheskiye yavleniya v gornyh porodah I vyrabotkah: Materialy XX Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly im. akademika S.A. Khristianovicha*, Simpheropol, Ukraine, pp. 193–196.

7. Kurinnoy, V.P. and Garkusha, I.P. (2010), "Definition of the pressure necessary for excitation of shock waves in rocks", *Deformirovaniye I razrusheniye materialov s defektami I dinamicheskiye yavleniya v gornyh porodah I vyrabotkah: Materialy XX Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly im. akademika S.A. Khristianovicha*, Simpheropol, Ukraine, pp. 196–199.

8. Ed. by Orlenko L.P. (2002), *Physica vzryva* [Physics of explosion. Ed. 3rd], in 1 vol. Phizmatlit, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 11.05.2017.