

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ЗОН РАЗДАВЛИВАНИЯ И ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

НАСИРОВ У. Ф., УМАРОВ Ф. Я., МАХМУДОВ Д. Р., ЗАИРОВ Ш. Ш.

В статье рассмотрена физическая картина и определены зоны взрывного разрушения массива горных пород. Разработана формула определения зоны раздавливания горных пород скважинными зарядами взрывчатого вещества (ВВ). Установлено, что величина зоны раздавливания горных пород при взрыве зарядов ВВ изменяется прямо пропорционально радиусу заряда, энергетическим показателям промышленных ВВ и обратно пропорционально критической скорости разлета частиц горных пород. Предложена созданная авторами схема исследования зоны трещинообразования при дроблении горных пород взрывом. Составлена формула определения радиуса зоны радиальных трещин. Установлено, что размер зоны радиальных трещин зависит от трещиноватости, физико-механических и горнотехнологических свойств горного массива, передачи энергии ВВ в волну напряжений и времени их воздействия на массив.

Ключевые слова: буровзрывные работы; твердая среда; продукты взрыва; зона раздавливания; зона трещинообразования; зона упругих деформаций; радиус заряда; энергетические показатели промышленных ВВ; критическая скорость разлета частиц; скорость продольных волн; растягивающие напряжения; тангенциальные напряжения; коэффициент поглощения.

Рассмотрим физическую картину взрывного разрушения массива горных пород по классической схеме действия взрыва. Согласно данной схеме, после практически одновременной детонации заряда ВВ в момент, когда детонационная волна доходит до поверхности заряда, соприкасающейся со средой, на породу действуют взрывные газы с высоким давлением. В результате этого в среде возникает волна сжатия, которая сжимает, раздавливает и переводит в текучее состояние слой породы на контакте *продукты взрыва–среда*. Материал среды здесь будет испытывать состояние всестороннего сжатия. Согласно представлению о действии взрыва в твердой среде [1–6] регулируемая зона дробления включает две зоны: зону раздавливания и зону трещинообразования (рис. 1).

Величина кинетической энергии, Дж, выделившейся при взрыве заряда ВВ, определяется по выражению

$$E = \pi r_{\text{раз}}^2 l_{\text{СКВ}} \gamma_{\text{ВВ}} Q,$$

где $r_{\text{раз}}$ – радиус зоны раздавливания, м; $l_{\text{СКВ}}$ – длина заряда ВВ, м; $\gamma_{\text{ВВ}}$ – объемный вес ВВ, кг/м³; Q – удельная энергия взрыва, кгм/кг.

Насиров Уткир Фатиidinovich – доктор технических наук, доцент, декан факультета инженерной геологии и горного дела. 100095, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Университетская, 2, Ташкентский государственный технический университет. E-mail: unasirov@yandex.ru

Умаров Фарходбек Яркулович – доктор технических наук, заместитель директора по учебной и научной работе. 100125, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Дурмон Йули, 34, филиал Российского государственного университета нефти и газа. E-mail: info@gubkin.uz

Махмудов Дилмурод Рахматжонович – заведующий кафедрой геотехнологии угольных и пластовых месторождений. 100095, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Университетская, 2, Ташкентский государственный технический университет. E-mail: dmahmudov@yandex.ru

Заиров Шерзод Шарипович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой добычи и переработки руд редких и радиоактивных металлов. 210100, Республика Узбекистан, г. Навои, ул. Южная, 27а, Навоийский государственный горный институт. E-mail: sher-z@mail.ru

Принимая, что кинетическая энергия массы горной породы равна энергии, выделяющейся при взрыве заряда ВВ, получим

$$0,5\pi l_{\text{скв}} \rho_{\text{гр}} v_0^2 r_{\text{раз}}^2 = \pi r_{\text{раз}}^2 l_{\text{скв}} \gamma_{\text{ВВ}} Q,$$

где $\rho_{\text{гр}}$ – плотность горных пород в зоне радиальных трещин, кг/м³; v_0 – скорость частиц горной породы на поверхности заряда, м/с.

Отсюда

$$v_0 = \sqrt{\frac{2Q\gamma_{\text{ВВ}}}{\rho_{\text{гр}}}}.$$

Исходя из положений кинетической теории, через любую сферическую поверхность вокруг заряда в единицу времени проходит объем материала, равный объему газов, вышедших за пределы начальных границ заряда, т. е.

$$4\pi r^2 v = 4\pi r_{\text{раз}}^2 v_0,$$

или

$$v = v_0 \left(\frac{r_{\text{раз}}}{r} \right)^2, \quad (1)$$

где r – радиус заряда ВВ, м; v – скорость частиц горных пород на расстоянии, м/с.

С учетом выражения (1) получим

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma_{\text{ВВ}} Q}{\rho}} \left(\frac{r_{\text{раз}}}{r} \right)^2,$$

где ρ – плотность горных пород, кг/м³.

Поскольку $\rho = \Delta/g$, Δ – объемный вес породы в естественном состоянии, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с², формула для определения значения v может быть представлена в виде

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma_{\text{ВВ}} Q g}{\Delta}} \left(\frac{r_{\text{раз}}}{r} \right)^2.$$

Принимая, что $v = v_{\text{кр}}$, $v_{\text{кр}}$ – критическая скорость частиц горных пород, м/с, определим радиус зоны раздавливания горных пород скважинными зарядами ВВ

$$r_{\text{раз}} = \frac{r^4 \sqrt{\gamma_{\text{ВВ}} Q / \Delta}}{0,476 \sqrt{v_{\text{кр}}}}.$$

Таким образом, установлено, что величина зоны раздавливания горных пород при взрыве зарядов ВВ изменяется прямо пропорционально радиусу заряда, энергетическим показателям промышленных ВВ и обратно пропорционально критической скорости разлета частиц горных пород.

По данным работ [7, 8], размер образовавшейся зоны раздавливания также зависит от давления продуктов взрыва, прочностных и упругих свойств окружающей заряд породы. Радиус этой зоны предлагается оценивать с помощью зависимости:

$$r_{\text{раз}} = rC_p \frac{\sqrt{\rho}}{5\sigma_{\text{сж}}},$$

где C_p – скорость продольных волн в массиве, м/с; $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности пород на сжатие, МПа.

Таким образом, установлено, что радиус зоны раздавливания при взрывном разрушении массива горных пород прямо пропорционально зависит от радиуса заряда ВВ, скорости распространения продольных волн напряжений, плотности взрывааемых пород и обратно пропорционально – от предела прочности горных пород на сжатие.

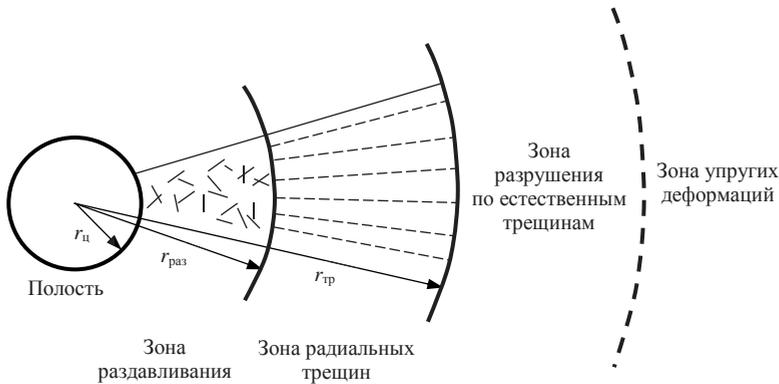


Рис. 1. Зоны взрывного разрушения массива горных пород

Зона трещинообразования (зона образования радиальных трещин) обусловлена наличием тангенциальных растягивающих напряжений, превышающих предел прочности породы на разрыв. Исследованиями установлено [7, 8], что при удалении от центра взрыва интенсивность напряжений, вызванных волной сжатия, снижается, и процесс разрушения горных пород носит иной характер. Частицы породы, вовлеченные в движение волной сжатия, продолжают перемещаться вдоль радиусов, исходящих от центра взрыва. В результате каждый элементарный цилиндрический слой, мысленно выделяемый в среде, растягивается, увеличивая свой радиус, что приводит к появлению системы радиальных трещин, расходящихся во все стороны от заряда. Нарушение сплошности горного массива в зоне происходит путем образования микротрещин, направленных по нормальям к поверхности заряда. Появление радиальных трещин обусловлено наличием тангенциальных растягивающих напряжений, повышающих предел прочности горного массива на разрыв. При дальнейшем удалении от центра взрыва заряда деформации, вызванные растягивающими напряжениями, прекращаются, и новые трещины не образуются. Однако возникающие ранее трещины могут распространяться еще на некоторое расстояние благодаря перераспределению напряжений около их концов, где происходит концентрация растягивающих усилий.

При рассмотрении двумерной задачи в полярной системе координат, согласно работе [9], напряженное состояние в окрестности скважины с внутренним давлением P описывается радиальной σ_r и азимутальной σ_θ компонентами напряжений

(рис. 2). При переходе к прямоугольной системе координат необходимо учитывать соотношения:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta; \\ \sigma_y &= \sigma_r \sin^2 \theta + \sigma_\theta \cos^2 \theta; \\ \tau_{xy} &= (\sigma_r - \sigma_\theta) \cos \theta \sin \theta.\end{aligned}\quad (2)$$

В случае одновременного взрывания зарядов ВВ напряженное состояние массива по линии зарядов в наименьшей степени возникает в середине между ними. В связи с этим при выборе параметров зарядов необходимо учитывать условия обеспечения разрушения породы в слое с заданной шириной Δ напротив середины расстояния между зарядами.

При оценке напряженного состояния в точке B следует считать $\sigma_0^B = 0$, так как при одновременном взрыве соседних зарядов ВВ смещение массива в точках, лежащих на линии AB в радиальном от заряда направлении, невозможно.

В точке B тангенциальные напряжения τ_{xy}^B от взрыва соседних зарядов равны по величине, но обратны по направлению. Поэтому результирующее значение $\tau_{xy}^B = 0$. При этом, учитывая суммирование радиальных напряжений, уравнения (2) для точки B примут вид:

$$\begin{aligned}\sigma_x^B &= 2\sigma_r \cos^2 \theta; \\ \sigma_y^B &= 2\sigma_r \sin^2 \theta; \\ \tau_{xy} &= 0.\end{aligned}$$

Здесь

$$\cos^2 \theta = \frac{a^2}{a^2 + \Delta^2}; \quad \sin^2 \theta = \frac{\Delta^2}{a^2 + \Delta^2},$$

где a – расстояние между скважинами, м.

Растягивающие напряжения в точке B и радиальное напряжение от взрыва одиночного скважинного заряда рассчитываются по формулам [10]:

$$\sigma_p^B = \sigma_y^B - \mu \sigma_x^B; \quad (3)$$

$$\sigma_r(r) = P f_p(r) f_3(r),$$

где μ – коэффициент Пуассона, характеризующий деформационные свойства горных пород; P – давление продуктов детонации на стенки скважины, Па; $f_p(r)$ – функция геометрического расхождения цилиндрических волн с расстоянием, $f_3(r) = (r_c / r)^{0.5}$; $f_3(r)$ – функция поглощения, учитывающая диссипативные потери, $f_3(r) = e^{-\alpha r / r_c}$, r_c – радиус скважинного заряда ВВ, м, r – расстояние до скважинного заряда ВВ, м.

Коэффициент поглощения α определяется с учетом акустической жесткости пород

$$\alpha = -0,155 \cdot 10^{-8} \rho V + 0,773,$$

где ρ – плотность горных пород, кг/м³; V – скорость распространения продольных волн в массиве горных пород, м/с.

При

$$r = 0,5(a^2 + \Delta^2)^{0,5}$$

путем перестановки в формуле (3) значений σ_y^B , σ_x^B и σ_r получим

$$\sigma_p^B = 2Pd_c^{0,5}(\mu a^2 - \Delta^2)(a^2 + \Delta^2)^{-1,25} \exp\left(-\alpha(a^2 + \Delta^2)^{0,5} d_c^{-1}\right),$$

где d_c – диаметр скважины, м.

Дробление породы в слое шириной Δ возможно при условии

$$\sigma_p^B \geq [\sigma_p] k_{тр} \psi,$$

где $[\sigma_p]$ – прочность породы на разрыв при динамическом режиме нагружения, Па; $k_{тр}$ – коэффициент, учитывающий влияние трещиноватости массива; ψ – коэффициент, учитывающий предварительное ослабление породы динамической составляющей волны напряжений.

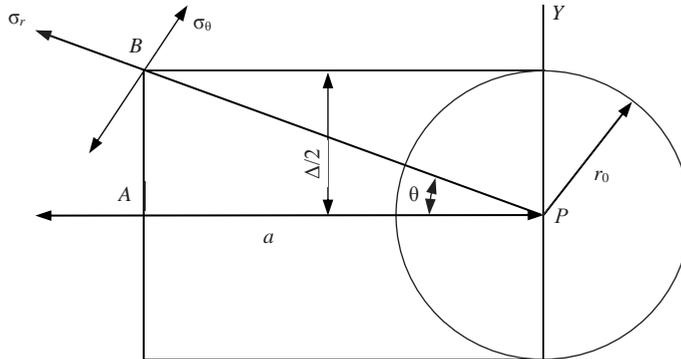


Рис. 2. Схема исследования зоны трещинообразования при дроблении горных пород взрывом:
 r_0 – радиус заряда ВВ, м

Если плотность заряда в скважинах малая, то давление продуктов детонации на стенки скважин можно рассчитать по формуле [11]:

$$P = Q\omega(\gamma - 1)(\mathcal{G}_c - \alpha_k)^{-1},$$

где Q – масса заряда ВВ в скважине, кг; ω – удельная энергия ВВ, Дж/кг; γ – показатель изэнтропии; \mathcal{G}_c – объем скважины, м³; α_k – коволюм; поскольку давление в скважине не превышает 200 МПа, величиной α_k можно пренебречь.

С учетом соотношения

$$Q/\mathcal{G}_c = 4q/(\pi d_c^2)$$

давление продуктов детонации на стенки скважин примет вид:

$$P = 4q\omega(\gamma - 1)\eta(\pi d_c^2)^{-1},$$

где q – линейная масса заряда, кг/м; $4\omega(\gamma - 1)\eta$ – коэффициент, учитывающий потери энергии.

Исследованиями [12] установлено, что размер зоны радиальных трещин зависит от трещиноватости, физико-механических и горнотехнологических свойств горного массива, передачи энергии ВВ в волну напряжений и времени их воздействия на массив.

Радиус зоны радиального трещинообразования $r_{тр}$ определяется по формуле:

$$r_{тр} = \frac{\mu}{1 + \mu} \cdot \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}, \quad (4)$$

где σ_p – предел прочности пород на растяжение, МПа; μ – коэффициент Пуассона, характеризующий деформационные свойства горных пород,

$$\mu = \frac{C_p^2 - 2C_s^2}{2(C_p^2 - 2C_s^2)}, \quad (5)$$

C_p, C_s – скорость распространения продольных и поперечных волн соответственно, м/с.

Преобразовав формулы (4) и (5), получим окончательную формулу расчета радиуса зоны трещинообразования при дроблении горных пород взрывом:

$$r_{тр} = \frac{r_0 C_p}{\sigma_p} \cdot \frac{C_p^2 - 2C_s^2}{3C_p^2 - 4C_s^2} \sqrt{\frac{\gamma \sigma_{сж}}{5}}.$$

Таким образом, исследованиями установлено, что радиус зоны трещинообразования прямо пропорционально зависит от радиуса заряда ВВ, скорости распространения продольных волн напряжений, предела прочности горных пород на сжатие и обратно пропорционально – от скорости распространения поперечных волн напряжений и предела прочности горных пород на растяжение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник взрывника / Б. Н. Кутузов [и др.] М.: Недра, 1988. 511 с.
2. Мельников Н. В., Марченко Л. Н. Энергия взрыва и конструкция заряда. М.: Недра, 1964. 164 с.
3. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действия взрыва в горных породах. М.: Недра, 1976. 271 с.
4. Норов Ю. Д., Бибик И. П., Заиров Ш. Ш. Управление эффективными параметрами буровзрывных работ по критерию качества взорванной горной массы // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. № 1. С. 34–39.
5. Управление параметрами буровзрывных работ и устойчивостью бортов на карьерах / Н. П. Снитка [и др.] Ташкент: Фан, 2017. 288 с.
6. Zairov Sh., Ravshanova M., Karimov Sh. Scientific and technical fundamentals for explosive destruction of the mass composed of rocks with different hardness // Mining of Mineral Deposits. 2017. No. 11(2). P. 46–51.
7. Ракишев Б. Р. Энергоемкость механического разрушения горных пород. Алматы: Баспагер, 1998. 210 с.
8. Лукьянов А. Н. Разработка научных основ, исследование и внедрение методов и средств интенсификации технологических процессов при открытой разработке скальных сложноструктурных месторождений отрасли: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1983. 452 с.
9. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1999. 560 с.
10. Миронов П. С. Взрывы и сейсмобезопасность сооружений. М.: Недра, 1995. 168 с.
11. Кузнецов Г. В. Взрывные работы. М.: Недра, 1993. 368 с.
12. Ракишев Б. Р., Винокуров Л. В. Пеленгация источников возмущения в массиве горных пород. Алматы: НИЦ «Гылым», 2002. 236 с.

THE STUDY OF THE MEASUREMENTS OF THE ZONES OF CRUSHING AND FISSURING UNDER THE BLASTING DESTRUCTION OF ROCKS

Nasirov U. F. – Tashkent State Technical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan. E-mail: unasirov@yandex.ru
Umarov F. Ia. – Russian State University of Oil and Gas, Tashkent, Republic of Uzbekistan. E-mail: info@gubkin.uz
Makhmudov D. R. – Tashkent State Technical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan. E-mail: dmahmudov@yandex.ru

Zairov Sh. Sh. – Navoiy State Mining Institute, Navoiy, Republic of Uzbekistan. E-mail: sher-z@mail.ru

The article considers the physics and determines the zones of blasting destruction of the massif of rocks. The formula has been worked out to determine the zone of rocks crushing with downhole charges of explosive. It has been stated that the value of the zone of crushing of rocks under the blast of explosive charges changes directly proportional to the charge radius, energetic indices of industrial explosives, and it changes in inverse proportion to critical speed of rock particles projection. The scheme of investigating the zone of fissuring at rock crushing with a blast created by the authors has been suggested. The formula to determine the radius of the zone of radial fractures has been worked out. It has been stated that the measure of the zone the radial fractures depends on the rock jointing, physical-mechanical and mining-technological properties of rock massif, the transfer of explosives energy into the strain wave, and the period of their influence on the massif.

Key words: drilling and blasting operations; solid medium; products of a blast; zone of crushing; zone of rock jointing; zone of elastic deformations; charge radius; energy indicators of industrial explosives; critical speed of rock particles projection; speed of longitudinal waves; tensile stresses; tangential stresses; absorption coefficient.

REFERENCES

1. Kutuzov B. N., and others. *Spravochnik vzryvnika* [The reference book of a blaster]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 511 p.
2. Mel'nikov N. V., Marchenko L. N. *Energii vzryva i konstruktivnaia zariada* [The energy of a blast and the construction of a charge]. Moscow, Nedra Publ., 1964. 164 p.
3. Mosinets V. N. *Drobiashchee i seismicheskoe deistviia vzryva v gornnykh porodakh* [Crushing and seismic action of a blast in rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 271 p.
4. Norov Iu. D., Bibik I. P., Zairov Sh. Sh. [Control over the efficient parameters of drilling and blasting operations by the criterion of the quality of blasted rock mass]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2016, no. 1, pp. 34–39. (In Russ.)
5. Snitka N. P., and others. *Upravlenie parametrami burovzryvnykh rabot i ustoychivost'iu bortov na kar'erakh* [Control over the efficient parameters of drilling and blasting operations and the sustainability of the edges of open pits]. Tashkent, Fan Publ., 2017. 288 p.
6. Zairov Sh., Ravshanova M., Karimov Sh. [Scientific and technical fundamentals for explosive destruction of the mass composed of rocks with different hardness]. *Mining of Mineral Deposits*, 2017, no. 11(2), pp. 46–51.
7. Rakishev B. R. *Energoemkost' mekhanicheskogo razrusheniia gornnykh porod* [Energy content of rock mechanical destruction]. Almaty, Baspager Publ., 1998. 210 p.
8. Luk'ianov A. N. *Razrabotka nauchnykh osnov, issledovanie i vnedrenie metodov i sredstv intensivatsii tekhnologicheskikh protsessov pri otkrytoi razrabotke skal'nykh slozhnostrukturykh mestorozhdenii otrasli: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [The development of scientific fundamentals, investigation and implementation of the methods and means of technological processes intensification under opencast exploitation of hard rock complex structures deposits of a branch. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 1983. 452 p.
9. Timoshenko S. P., Gud'er Dzh. *Teoriia uprugosti* [Elasticity theory]. Moscow, Nauka Publ., 1999. 560 p.
10. Mironov P. S. *Vzryvy i seismobezopasnost' sooruzhenii* [Blasts and seismic safety of facilities]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 168 p.
11. Kuznetsov G. V. *Vzryvnye raboty* [Blasting operations]. Moscow, Nedra Publ., 1993. 368 p.
12. Rakishev B. R., Vinokurov L. V. *Pelegatsiia istochnikov vozmushcheniia v massive gornnykh porod* [Direction finding of perturbation sources in rock massif]. Almaty, NITs Fylym Publ., 2002. 236 p.