УДК 622.235.53

Г.П.ПАРАМОНОВ, *д-р техн. наук, профессор, paramonov@spmi.ru*
А. В.ФЕДОСЕЕВ, *аспирант, fedos8787@mail.ru*
Ю.С.ГАПОНОВ, *аспирант, ysgap@nikel.spb.su*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

G.P.PARAMONOV, *Dr. in eng. sc., professor, paramonov@spmi.ru*
A.V.FEDOSEEV, *post-graduate student, fedos8787@mail.ru*
Yu. S. GAPONOV, *post-graduate student, ysgap@nikel.spb.su*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ МАССИВА НА ЕГО РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Изложен метод расчета сетки скважинных зарядов, основанный на совмещении зон разрушения. Рассмотрены механизмы передачи энергии и изменение напряжений в зависимости от материала, заполняющего трещины, при взрывном разрушении трещиноватых горных пород.

Ключевые слова: зона разрушения, трещиноватость, скорость продольной волны, заполнитель трещин.

ASSESSMENT OF CRACKED AREA TO ITS DESTRUCTION IN THE PRODUCTION OF BLASTING

The method of calculating the net hole charges, based on a combination of fracture zones. The mechanisms of energy transfer and change of stress, depending on the material filling the cracks in the explosive destruction of the fractured rocks.

Key words: zone of destruction, jointing, compressional speed, crack filler.

Для каждого месторождения характерны определенные структурные особенности массива. В зависимости от параметров трещиноватости возможны различные механизмы передачи энергии: разрушение в результате действия волны напряжения, распространяющейся от заряда взрывчатого вещества (ВВ), или продуктов детонации взрыва.

Когда трещины заполнены плотным материалом, разрушение происходит в основном за счет волны напряжения, так как по времени она значительно опережает действие газообразных продуктов взрыва, которое в данном случае незначительно. Когда трещины заполнены воздухом, волна напряжения, распространяющаяся от заряда, разрушает только отдельность, в которой он расположен, дальнейшее разрушение происходит под действием продуктов детонации.

Практика ведения горных работ показывает, что при составлении проекта массового взрыва индивидуальные особенности структурного строения взрываемого блока, как правило, не учитываются. В связи с этим расчетные параметры сетки скважин не соответствуют требованиям на получение заданного гранулометрического состава взорванной горной массы. Учет структурных особенностей (трещиноватости, блочности) массива при расчете параметров взрывного рыхления позволяет повысить эффективность взрывных работ (качество дробления горной массы).

Применяемые методики определения параметров сетки взрывных скважин осно-

ваны на эмпирических зависимостях. Они не учитывают некоторых важных характеристик массива, ВВ, а также зависимость механизма разрушения от вещества, заполняющего трещины. Так, например, линия наименьшего сопротивления W для эмульсионных ВВ определяется по формуле Демидюка [5]

$$W = 28 d_з \sqrt{\frac{k_{ВВ}\rho_{ВВ}}{q}},$$

где $d_з$ – диаметр заряда; $k_{ВВ}$ – коэффициент относительной работоспособности ВВ; $\rho_{ВВ}$ – плотность заряда; q – удельный расход ВВ.

Для гранулированных ВВ линия наименьшего сопротивления рассчитывается по формуле Давыдова [2]

$$W = 53 k_т d_з \sqrt{\frac{\rho_{ВВ}}{\rho_п k_{ВВ}}},$$

где $\rho_п$ – плотность породы; $k_т$ – коэффициент трещиноватости.

Сетка скважин a, b определяется зависимостью [2]

$$a = b = mW,$$

где m – коэффициент сближения скважин; W – линия наименьшего сопротивления.

Предлагаемая методика определения сетки взрывных скважин основана на расчете зон разрушения и их совмещении. Зоны разрушения определяются с учетом структурных особенностей массива и механизма его разрушения.

Линия наименьшего сопротивления W и расстояние между рядами скважин b рассчитываются по формуле [1]

$$W = b = R_{тр} + b_{отк},$$

где $R_{тр}$ – радиус зоны трещинообразования; $b_{отк}$ – размер зоны откола.

Расстояние между скважинами в ряду [1]

$$a = 2R_{тр}.$$

Зона откола образуется только в случае, когда волна напряжения, распространяющаяся от заряда, достигает свободной поверхности и ее размер $b_{отк}$ определяется из условия совпадения суммарного напряжения в прямой и отраженной от поверхности уступа волне динамическому пределу прочности породы на отрыв [1]:

$$[\sigma_{отр}^{дин}] = -\sigma_{r_{max}}(W + b_{отк}) + \sigma_{r_{max}}(W - b_{отк})F(r, t_1),$$

где $[\sigma_{отр}^{дин}]$ – динамический предел прочности породы на отрыв; $-\sigma_{r_{max}}(W + b_{отк})$ – максимальное напряжение в отраженной волне; $\sigma_{r_{max}}(W - b_{отк})$ – максимальное напряжение в прямой волне; $F(r, t_1)$ – функция, описывающая форму волны напряжения.

Размеры зоны трещинообразования $R_{тр}$ определяются при совпадении максимальной амплитуды тангенциальной составляющей волны напряжения и динамического предела прочности породы на отрыв [1]:

$$\sigma_{\varphi max}(R_{тр}) \geq \left|\sigma_{отр}^{дин}\right|,$$

где $\sigma_{\varphi max}$ – максимальная амплитуда тангенциальной составляющей волны напряжения.

Когда трещины заполнены водой или материалом, по упругости близким к упругости породы, массив ведет себя подобно монолитному и разрушение происходит в бóльшей степени под действием волны напряжения, распространяющейся от заряда. Изменение растягивающего напряжения

$$\sigma_{\varphi max} = \frac{\nu}{1-\nu}\left(\frac{P_ф}{\overline{r}_{ср}^{1,1}}\right)\left(\frac{R_{0з}^{эф}}{R_{0з}}\right)^{1,1},$$

где ν – коэффициент Пуассона; $P_ф$ – давление на фронте ударной волны, преломленной в окружающую среду; $\overline{r}_{ср}$ – средний относительный радиус; $R_{0з}^{эф}$ – эффективный радиус, учитывающий энергию диссипации, которая изменяется в зависимости от скорости продольной волны; $R_{0з}$ – радиус заряда.

Скорость распространения продольной волны в трещиноватой среде $C_р$ определяется по формуле [6]

$$C_{\text{р}} = C_{\text{р}_0}\left(\frac{l_2 E_1}{l_1 E_2} + 1\right)^{-\frac{1}{2}},$$

где $C_{\text{р}_0}$ – скорость распространения продольной волны в монолитной среде; l_1 – среднее расстояние между трещинами; l_2 – величина раскрытия трещин; E_1 – модуль упругости породы; E_2 – модуль упругости заполнителя трещин.

В результате изменения скорости распространения продольной волны изменятся адиабаты нагрузки и разгрузки, следовательно, и размеры зон разрушения.

Если трещина заполнена воздухом и стенки ее не смыкаются под действием упругих деформаций, волна напряжения экранируется, теряя энергию. Разрушение происходит за счет соударения отдельностей под действием газообразных продуктов взрыва. Растягивающие напряжения, возникающие непосредственно в отдельностях, могут быть вычислены по формуле [3]

$$\sigma_{\varphi\max} = \upsilon_{\max} d_e \frac{\nu}{1-\nu}\sqrt{\frac{E_{\text{т}}\rho}{\pi\left(r^2 - \frac{d_e^2}{4}\right)}},$$

где $\upsilon_{\max}$ – максимальная скорость смещения раздробленной отдельности; d_e – размер отдельности; ν – коэффициент Пуассона; $E_{\text{т}}$ – модуль упругости трещиноватого массива; r – расстояние от заряда до заданной точки.

Модуль Юнга трещиноватого массива [4]

$$E_{\text{т}} = \frac{E}{1 + \frac{l_2}{d_e \xi}\sum_1^k \left(1 - \sin^4\theta\right)},$$

где E – модуль упругости отдельности; l_2 – величина раскрытия трещин; ξ – безразмерная площадь контактов между отдельностями; k – количество систем трещин; θ – угол наклона системы трещин к направлению движения части отдельности.

Максимальная скорость смещения раздробленной отдельности определяется из условия, что продолжительность развития трещины от заряда до ближайшей границы отдельности не превышает продолжительности установления среднего давления в зарядной полости [3]:

$$\upsilon_{\max} = 0{,}39D\frac{\rho_{\text{ВВ}} d_{\text{з}}}{\rho_{\text{п}} d_e},$$

где D – скорость детонации ВВ; $\rho_{\text{ВВ}}$ – плотность ВВ; $d_{\text{з}}$ – диаметр заряда; $\rho_{\text{п}}$ – плотность породы; d_e – размер отдельности.

Таким образом, при определении зон разрушения для формирования сетки взрывных скважин необходимо учитывать механизм разрушения массива. Это позволит оптимизировать размещение ВВ во взрываемом блоке, улучшив тем самым качество дробления горной массы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волны напряжений в обводненном трещиноватом массиве / В.А.Боровиков, И.Ф.Ванягин, М.Г.Менжулин, С.В.Цирель; Ленинградский горный институт. Л.,1989.

2. *Кутузов Б.Н.* Методы ведения взрывных работ. Ч.2. Взрывные работы в горном деле и промышленности: Учебник для вузов. М., 2008.

3. *Кутузов Б.Н.* Определение размеров зон деформирования трещиноватости массива взрывом заряда ВВ / Б.Н.Кутузов, В.Н.Тюпин // Горный журнал. 1983. № 4.

4. *Руппенейт К.В.* Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. М., 1975.

5. *Ханукаев А.Н.* Физические процессы при отбойке пород взрывом. М., 1974.

6. *Якобашвили О.П.* Сейсмические методы оценки состояния массива горных пород на карьерах. М., 1992.

REFERENCES

1. *Borovikov V.A., Vanyagin I.F., Menzhulin M.G., Tsirel S.V.* Stress Waves in a fracturedaquifer array / Leningrad Mining Institute. Leningrad, 1989.

2. *Kutuzov B.N.* Methods of blasting. Part 2. Blasting operations in mining and industry: A textbook for high schools. Moscow, 2008.

3. *Kutuzov B.N., Tyupin V.N.* Determination of the fracture zone of deformation of solidexplosive charge blast // Mining Journal. 1983. N 4.

4. *Ruppeneyt K.V.* Deformability of fractured rock massifs. Moscow, 1975.

5. *Hanukaev A.N.* Physical processes in the breaking of rocks by explosion. Moscow, 1974.

6. *Yakobashvili O.P.* Seismic methods for assessing the state of rock in quarries. Moscow, 1992.