

**И.Б. Гирич****ВЗРЫВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ МАССИВОВ**

Предложен метод оптимизации параметров БВР с учетом физико-технических характеристик горных пород в пределах взрываемого блока, с целью улучшения качества взрыва на карьерах со сложной геологической структурой.

Приведены результаты лабораторных экспериментов, подтверждающие эффективность изменения параметров БВР в зависимости от геологических особенностей неоднородного массива.

Ключевые слова: сложно-структурные массивы, георадар, градиент, дискретизация, крепость, трещиноватость, параметры БВР.

**К**ак уже говорилось ранее, взрывное разрушение сложно-структурных массивов имеет ряд особенностей, связанных с изменением прочностных свойств, в пределах взрываемого блока. Для оптимизации эффективности дробления массивов со сложной геологической структурой требуется детальная оценка физико-технических свойств пород и определение координат залегания пород с различными прочностными свойствами в пределах взрываемого блока.

Для оперативной оценки физико-технических свойств взрываемых блоков подходит метод георадиолокации [1] поверхностного слоя с применением георадаров. Результаты множества исследований подтвердили, что георадарные технологии могут быть использованы для детального изучения сложно-структурных массивов, а так же определения координат залегания пород с разными прочностными свойствами в пределах взрываемого блока, что позволит оптимизировать параметры БВР и подобрать необходимые параметры изменения сетки скважин, расположения зарядов в массиве и замедления между взрывами зарядов, для обеспечения качественного дробления.

Изменение прочностных характеристик пород взрываемого блока можно описать при помощи функции градиента а интенсивность изменения физико-механических свойств горных пород при помощи дискретизации.

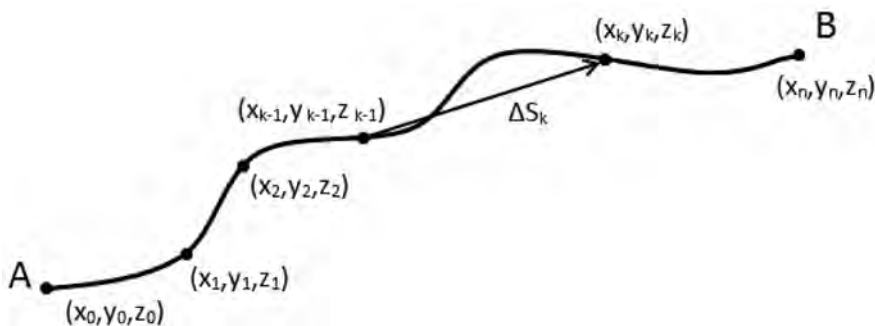
Функция свойств горной породы  $z = f(x, y)$ ;  $z = f(x_0 + t \cos \alpha, y_0 + t \sin \alpha)$  по параметру  $t$ . Производную функции  $z = f(x, y)$  по направлению  $\alpha$  обозначим  $f'(\alpha)$ . Она определяет изменение физико-механических свойств горной породы.

$$f'(\alpha) = \frac{dz}{dt} = \frac{\partial z}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial z}{\partial y} \frac{dy}{dt} = \frac{\partial z}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial z}{\partial y} \sin \alpha$$

Если функция  $f(\alpha)$  определяет физико-механические свойства массива, единичные векторы  $i$  и  $j$  – единицы крепости или трещиноватости, то  $\text{grad} f$  определяет, как резко изменяются физико-механические свойства массива по выбранному направлению

$$\text{grad} f = \frac{\partial f}{\partial x} i + \frac{\partial f}{\partial y} j$$

Чем больше значение  $\text{grad} f$ , тем меньше шаг дискретизации, и тем больше изменение параметров БВР по направлению, а так же изменение конструкции заряда и выбор ПВВ.



**Рис. 1. Разбиение кривой  $AB$  точками**

Рассмотрим разбиение кривой  $AB$  точками (рис. 1).

$$A = (x_0; y_0; z_0), (x_1; y_1; z_1) \dots (x_n; y_n; z_n) = B$$

Внутри каждой дуги разбиения (или на ее границе) выберем произвольную точку. Пусть это будут точки  $(\zeta_0; \eta_0; \xi_0), (\zeta_1; \eta_1; \xi_1) \dots (\zeta_n; \eta_n; \xi_n)$ .

Предположим, что вдоль  $k$ -ой дуги разбиения сила сохраняет постоянное значение (дискретизация силы разрушения и перемещения горной породы). Тогда приближенное значение работы, совершаемой силой  $F$  по  $k$ -ой дуге разбиения, равно скалярному произведению  $F(\zeta_k; \eta_k; \xi_k) \cdot \Delta S_k$ ; где  $\Delta S_k$  – обозначает вектор, соединяющий точку  $(x_{k-1}; y_{k-1}; z_{k-1})$  с точкой  $(x_k; y_k; z_k)$ , сила  $F$  является функцией точки.

$$\text{Пусть } F_x = P(x, y, z), F_y = Q(x, y, z), F_z = R(x, y, z).$$

Комплексные силы  $F$ , а  $\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k$  – компоненты вектора  $\Delta S_k$  в прямоугольной системе координат зависящие от выбранных параметров. Тогда приближенная величина работы, совершаемой на  $k$ -ом участке разбиения, равна

$$F(\zeta_k; \eta_k; \xi_k) \cdot \Delta S_k = P(\zeta_k; \eta_k; \xi_k) \cdot \Delta x_k + Q(\zeta_k; \eta_k; \xi_k) \cdot \Delta y_k + R(\zeta_k; \eta_k; \xi_k) \cdot \Delta z_k$$

Теперь просуммируем все производные работы от точки  $A$  к  $B$

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n F(\zeta_k; \eta_k; \xi_k) \cdot \Delta S_k = \\ & = \sum_{k=1}^n [P(\zeta_k; \eta_k; \xi_k) \cdot \Delta x_k + Q(\zeta_k; \eta_k; \xi_k) \cdot \Delta y_k + R(\zeta_k; \eta_k; \xi_k) \cdot \Delta z_k] \end{aligned}$$

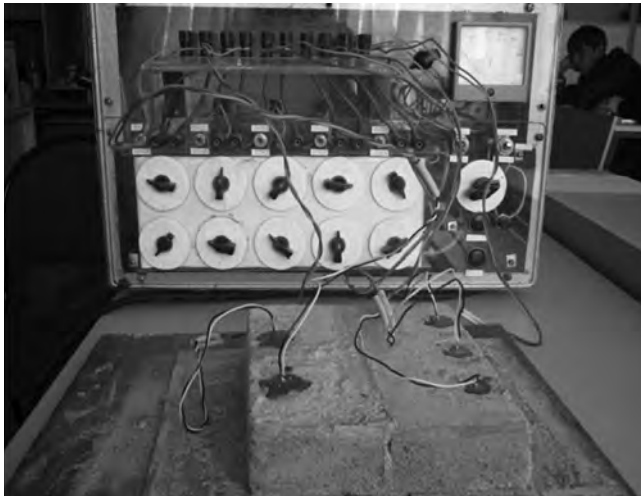
Предел этой суммы при максимальном разбиении на интервалы кривой  $AB$  и увеличении числа точек разбиения примем за отображение совершенной работы силы  $F$  на участке  $AB$

$$F \cdot \widehat{AB} = \int_{\widehat{AB}}^1 [P_{(x,y,z)} dx + Q_{(x,y,z)} dy + R_{(x,y,z)} dz]$$

взятый по кривой  $\widehat{AB}$  от точки до функции  $P_{(x,y,z)}, Q_{(x,y,z)}, R_{(x,y,z)}$ .

Значения силы  $F$  определяется параметрами БВР (массой заряда, сеткой скважин, замедлением) [2].

При плавном изменении крепости и трещиноватости горной породы от точки  $A$  к точке  $B$  плавно изменяются и параметры БВР (расстояние между



**Рис. 2. Пятиканальный генератор импульсов и модель взрываемого блока**

скважинными зарядами, замедления, удельный расход ПВВ и др.). При скачкообразном изменении крепости и трещиноватости горной породы от точки *A* к точке *B* параметры БВР изменяются так же скачкообразно.

Известно что, прочностные характеристики пород влияют на расположение зарядов на взрываемом блоке, соответственно при изменении крепости пород, меняется и расстояние между взрываемыми скважинами. Из этого следует, что изменение рас-

стояния между скважинами напрямую зависит от изменения шага дискретизации. Например, если крепость пород в пределах взрываемого блока изменяется от 4 до 16, то, согласно существующих рекомендаций, замедления меняются от 60 мс до 20 мс, а сетка скважин меняется от 9×9 до 4×4.

Для проверки теоретических исследований и изучения действия взрыва на сложноструктурные массивы, характеризующиеся как плавным переходом пород от одной крепости к другой, так и наличием в них твердых включений, в лабораторных условиях кафедры ВД (НИТУ «МИСиС») были проведены эксперименты на смоделированных разнопрочных блоках.

Взрывы моделей осуществлялись при помощи пятиканального генератора импульсов с использованием короткозамедленного взрывания (рис. 2).

Максимальное напряжение, до которого заряжаются конденсаторы – 260 В. В пятиканальном генераторе величина емкости в каждом из пяти каналов 3000 мкФ. Остаточное напряжение после имитации действия взрыва равно 50 В. Таким образом выделенная энергия при разряде конденсатора одного канала в пятиканальном генераторе

$$W_{\text{взр}} = \frac{CU^2}{2} - \frac{CU_{\text{ост}}^2}{2} \text{ Дж,}$$

$$W_{\text{взр}} = \frac{3000 \cdot 10^{-6} \cdot 260^2}{2} - \frac{3000 \cdot 10^{-6} \cdot 50^2}{2} = 101,4 - 3,75 = 97,65 \text{ Дж,}$$

где  $W$  – энергия, выделенная при имитации действия взрыва, Дж;  $C$  – емкость конденсатора, Ф;  $U$  – напряжение, до которого заряжается конденсатор, В;  $U_{\text{ост}}$  – напряжение, которое осталось на конденсаторах после имитации взрыва, В.

Выделенная энергия может быть уменьшена уменьшением напряжения, до которого заряжаются конденсаторы.

Общая максимальная энергия  $W_{\text{общ}}$ , которая может быть получена при имитации взрыва в пятиканальном генераторе

$$W_{\text{общ}} = 5 \cdot 97,65 = 488,25 \text{ Дж}$$

Модели массивов изготавливались из сухого кварцевого песка с частицами размером не более 0,25 мм с добавлением гипса и воды в различных соотношениях. В качестве ВВ применялся порох, взрывы моделей осуществлялись при помощи пятиканального генератора импульсов с использованием короткозамедленного взрывания.

Чтобы эксперимент в лабораторных условиях подходил к натурным в забое, необходимо правильно подобрать замедление для образца выбранного масштаба.

Замедление можно рассчитать по формулам

$$\bar{t} = \frac{t}{W} \left( gW + g \frac{P_a}{\rho} \right)^{1/2},$$

$$t_M = \frac{\bar{t}W_M}{\left( gW_M + g \frac{P_a}{\rho_M} \right)^{1/2}},$$

где  $\bar{t}$  и  $t_M$  – приведенное время и время замедления в модели, мс;  $W$  и  $W_M$  – расстояние между шпурами в натуре и в модели, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $P_a$  – атмосферное давление, гк/м<sup>3</sup>;  $\rho$  и  $\rho_M$  – объемная масса породы и модели, кг/м<sup>3</sup> [3].

В процессе проведения лабораторных исследований было проведено 3 серии опытов с различной вариацией изменения прочностных характеристик моделей блоков. В каждой из серий изготавливалось по две модели образцов. Одна модель взрывалась без учета изменения физико-технических свойств пород блока, а вторая с учетом меняющихся свойств. То есть вторая модель взрывалась с изменением параметров БВР (размер сетки скважин, диаметр заряда, время замедления).

В первой серии опытов (рис. 3) граница раздела пород проходила по центру блока. Во второй серии опытов (рис. 4) твердые породы располагались внутри модели в виде клина, а слабые по бокам. Клин твердых пород в образце имитировал хаотичное расположение включений твердых пород внутри породного массива. В третьей серии опытов (рис. 5) граница раздела крепости



**Рис. 3. Первая серия опытов**



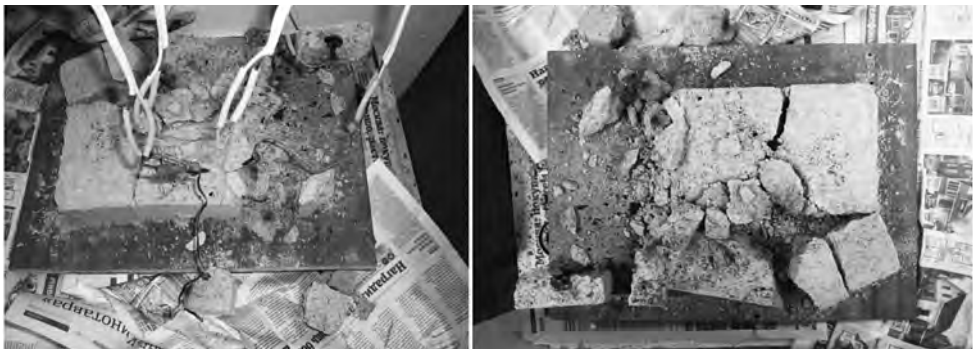
**Рис. 4. Вторая серия опытов**

пород была смешена в одном случае в сторону крепких пород, а в другом – в сторону слабых.

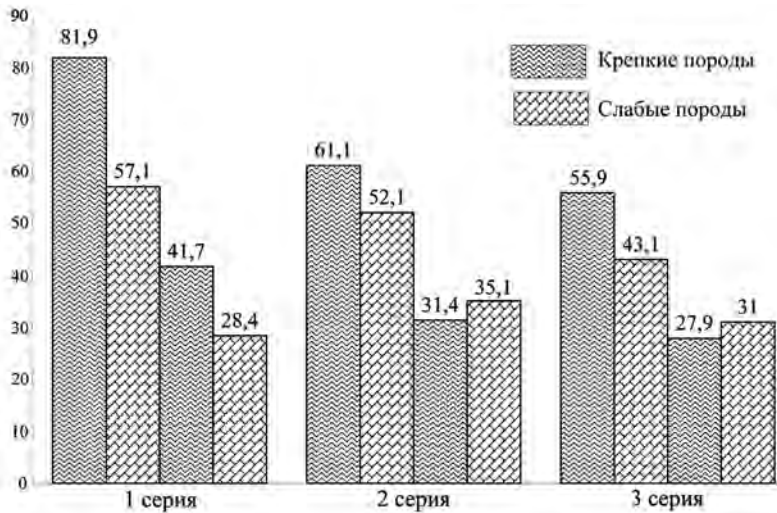
По опытным данным производилась оценка качества дробления породы. В качестве критериев эффективности дробления приняты выход  $\gamma$ , % крупных фракций и средний размер кусков  $d_{cp}$ , мм раздробленных образцов.

Такие вариации расположения твердых пород в образцах, имитировавших сложноструктурный взрываваемый массив, позволили оценить эффективное изменение параметров БВР в зависимости от геометрии включений и объемов разрушения крепких и слабых пород. Так как прочностные характеристики пород влияют на выбор параметров БВР, то выбор этих параметров напрямую будет зависеть от градиента изменения свойств горных пород, а шаг, с которым будут меняться параметры, будет зависеть от шага дискретизации. То есть, если изменение свойств происходит плавно, то параметры меняются плавно, а если изменение свойств резкое, то параметры меняются скачкообразно. Если в породном массиве имеются твердые включения, то необходимо располагать заряды так, чтобы ЛНС до границы раздела пород соответствовала радиусу регулируемого дробления [4].

В результате опытов установлено, что при взрывании образцов, с учетом изменяющихся свойств пород блока, а соответственно с изменением параметров БВР, в слабых породах образуются трещины и сколы, проходящие по границе раздела пород разных по крепости. Это способствует разгрузке крепких пород и облегчает действие зарядов в них. Таким образом, происходит более интенсивное дробление твердых пород в массивах со сложной геологической структурой.



**Рис. 5. Третья серия опытов**



**Рис. 6. Гистограмма выхода фракций**

На гистограмме производится сравнение выхода крупных фракций слабых и крепких пород и средних кусков при взрывании экспериментальных блоков без учета и с учетом изменяющихся свойств пород. Очевидно, что во втором случае эффективность дробления выше, чем в первом. При этом эффективность дробления в твердых породах возрастает, выход крупных фракций снижается на 26%. Так же при изменении параметров БВР наблюдается более равномерное дробление, как слабых пород, так и крепких включений, за счет увеличения выхода средних фракций.

### **Выводы**

В результате изменения параметров взрывных работ в пределах разрушаемых блоков с изменяющимися физико-механическими свойствами (расположение зарядов, последовательность взрывания, замедление между взрывами) возможно достижение более качественного дробления, чем при неизменных параметрах.

Выполнены лабораторные эксперименты, подтверждающие эффективность изменения параметров БВР в зависимости от геологических особенностей неоднородного массива.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Семейкин Н.П., Помозов В.В., Эквист Б.В., Монахов В.В. Геофизические приборы нового поколения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 8. – С. 249–253.
2. Совмен В.К., Кутузов Б.Н., Марьясов А.Л., Эквист Б.В., Токаренко А.В. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. – М.: Изд-во «Горная книга», 2012. – 228 с.

3. Эквист Б.В., Вартанов В.Г. Лабораторный практикум по дисциплине «Технология и безопасность взрывных работ»: Учебное пособие для вузов / Под ред. Б.Н. Кутузова. – М.: Изд-во МГТУ, 2006. – 50 с.
4. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом: Учебник для вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во «Горная книга», 2009. – 471 с. **ГИАБ**

### **КОРОТКО ОБ АВТОРЕ**

Гирич Ирина Борисовна – аспирант, e-mail: iriska19\_89@list.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

## THE EXPLOSIVEDESTRUCATION OF THE DIFFICULT STRUCTURAL MASSIF

Girich I.B., Graduate Student, e-mail: iriska19\_89@list.ru,  
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

*A method is proposed for optimization of drilling and blasting parameters including physical and technical characteristics of rocks within the shattered unit, with the aim of improving the quality of the explosion in open pits with complex geological structure. The presented results of laboratory experiments confirm the efficiency of variation of drilling-and-blasting parameters depending on geological features of a heterogeneous rock mass.*

*Key words: the difficult structural massif, georadar, gradient, sampling, fortress, fracturing, drilling and blasting parameters.*

### REFERENCES

1. Semeikin N.P., Pomozov V.V., Ekvist B.V., Monakhov V.V. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2007, no 8, pp. 249-253.
2. Sovmen V.K., Kutuzov B.N., Mar'yasov A.L., Ekvist B.V., Tokarenko A.V. *Seismicheskaya bezopasnost' pri vzryvnykh rabotakh* (Seismic safety in blasting), Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2012, 228 p.
3. Ekvist B.V., Vartanov V.G. *Laboratornyi praktikum po distsipline «Tekhnologiya i bezopasnost' vzryvnykh rabot»*: Uchebnoe posobie dlya vuzov. Pod red. B.N. Kutuzova (Laboratory course on blasting technology and safety. Higher educational aid. Kutuzov B.N. (Ed.)), Moscow, Izd-vo MGGU, 2006, 50 p.
4. Kutuzov B.N. *Metody vedeniya vzryvnykh rabot. Ch. 1. Razrushenie gornykh porod vzryvom: Uchebnik dlya vuzov. 2-e izd.* (Methods of blasting. Part 1. Blasting of rocks. Textbook for high schools, 2nd edition), Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2009, 471 p.



## ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ РАБОТЫ ПО ПОДЪЕМУ ГОРНОЙ МАССЫ ПО ВЫСОТНЫМ ЗОНАМ КАРЬЕРОВ

Левченко Ярослав Викторович – аспирант, преподаватель, e-mail: levchenko.mgggu@mail.ru,  
МГИ НИТУ «МИСиС».

*На основе зонного принципа компоновки транспортных схем и схем вскрытия карьеров рассмотрены изменения транспортной работы для карьеров, обрабатывающих залежи, представленные брахисинклинальными складками и пластами с крутым падением. Определены высотные зоны карьеров, обладающие максимальными значениями транспортной работы, и даны рекомендации по снижению нагрузки с группы наиболее «тяжелых» горизонтов.*

*Ключевые слова: зонный принцип, транспортная работа, брахисинклиналь, грузооборот, высота подъема пород, длина транспортирования, уголь.*

### PATTERNS OF CHANGES TRANSPORT WORK TO RAISE THE ROCK MASS AT THE HIGH-RISE ZONES PIT

Levchenko Ya.V., Graduate Student, Lecturer, e-mail: levchenko.mgggu@mail.ru,  
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

*Based on the principle of a band arrangement of transport schemes and schemes of opening quarries considered changing transport operation for quarries earning their deposits represented brahisinklinalnymi folds and layers with a steep drop. Defined altitude zone quarries having maximum values of the transport operation, and recommendations for reducing the burden to the group of the most «heavy» horizons.*

*Key words: band principle, transport work, brahisinklinal, turnover, height species, length of transportation, coal.*