

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МАССИВОВ СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ

Б. Эквист^{1*}

¹Кафедра физических процессов горного производства и геоконтроля, Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва, Россия

*Ответственный автор: e-mail borisekwist@mail.ru, тел. +789672012440, факс: +74992302570

OPTIMIZATION OF BLASTING WORKS DURING THE DESTRUCTION OF MASSES WITH COMPLEX STRUCTURE

B. Ekvist^{1*}

¹Physical Processes of Mining and Geocontrol Department, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

*Corresponding author: e-mail borisekwist@mail.ru, tel. +789672012440, fax: +74992302570

ABSTRACT

Purpose. To study the quality of crushing rocks with different strength properties, depending on parameters of the charges location and the blasting time.

Methods. Based on the destruction of laboratory samples, histograms of granulometric composition were constructed and analyzed depending on the charges location and the blasting time.

Findings. The regularities of the granulometric composition are received depending on the charges location and the blasting time.

Originality. The improvement of crushing due to explosions of charges with changed parameters depending on strength properties of samples is proved.

Practical implications. The method is proposed for changing the location of charges and the time of their blasting, depending on the rock mass structure, which is obtained, in particular, during its radiographic inspection by the georadar.

Keywords: masses with complex structure, georadar, georadiolocation, gradient, strength properties of rocks, parameters of drilling and blasting operations, explosion results

1. ВВЕДЕНИЕ

Взрывное разрушение сложноструктурных массивов имеет ряд особенностей, связанных с изменением прочностных свойств, в пределах взрываемого блока. Для оптимизации эффективности дробления массивов со сложной геологической структурой требуется оценка физико-технических свойств пород и определение координат их залегания с различными прочностными свойствами в пределах взрываемого блока.

Для оперативной оценки физико-технических свойств взрываемых блоков подходит метод георадиолокации (Kulizhnikov, Burda, & Belozarov, 2004; Semeykin, Pomozov, Ekvist, & Monakhov, 2008) поверхностного слоя с применением георадаров. Георадарные технологии могут быть использованы для детального изучения сложноструктурных массивов, а также определения координат залегания пород с разными прочностными свойствами в пределах взры-

ваемого блока, что позволит оптимизировать параметры буровзрывных работ (БВР) и подобрать необходимые размеры сетки расположения зарядов и замедления между их взрывами. Возможен метод радиолокации с применением георадаров серии "Око-2" разработки группы компаний "ЛОГИС-ГЕОТЕХ" с антенными блоками АБ-90 с глубиной зондирования до 16 м и разрешающей способностью 0.5 м по глубине и АБ-150 с глубиной зондирования 12 м и разрешающей способностью 0.35 м по глубине. Это обеспечит более качественное дробление взорванной горной массы. При плавном изменении крепости и трещиноватости горной породы параметры БВР (расстояние между зарядами, замедления, удельный расход ВВ и др.) изменяются плавно, при скачкообразном – скачкообразно.

Известно, что прочностные характеристики пород влияют на расположение зарядов на взрываемом блоке и замедления между их взрывами. Например, если

крепость взрывааемых пород уменьшается, то согласно существующим рекомендациям, замедления между взрывами возрастают, а расстояния увеличиваются (Kutuzov, 2009; Gorokhov, 2011; Sovmen, Kutuzov, Mar'yasov, Ekvist, & Tokarenko, 2012). На результаты взрыва влияют и другие параметры среды: вязкость, трещиноватость, обводненность и др. В данной статье приведены результаты влияния прочностных свойств на основе лабораторных экспериментов.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

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, проведены эксперименты на смоделированных разнопрочных блоках размером 40×30 см и толщиной 4 см, расположение зарядов в которых показано на Рисунках 1, 2. Расстояние между зарядами, без учета прочностных свойств, взрывааемых блоков, по большей стороне блока 20 см и по меньшей стороне блока 15 см.

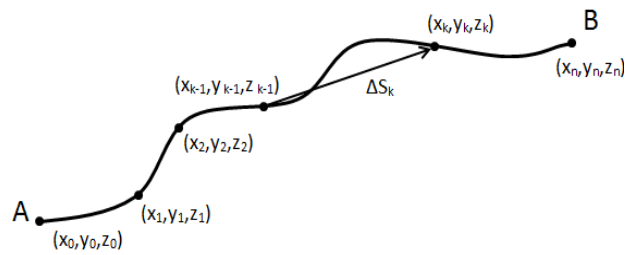


Рисунок 1. Расположение зарядов (дискретизация)

Расстояния между зарядами, измененными с учетом прочностных характеристик взрывааемых блоков, приведены на Рисунке 1 в масштабе относительно размеров взрывааемых блоков. Количество зарядов менялось в зависимости от прочностных характеристик и структуры взрывааемых блоков. Незакрашенные части блоков имели коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Протодяконова 1.5 – 2, а окрашенные 2.5 – 3. Модели блоков изготавливались из сухого кварцевого песка с частицами размером не более 0.25 мм с добавлением гипса и воды в различных соотношениях.

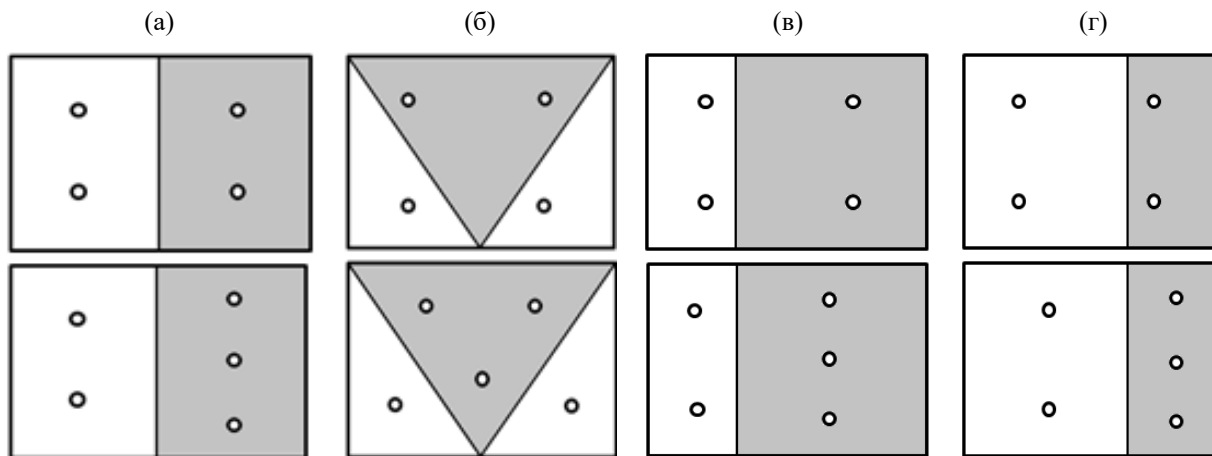


Рисунок 2. Схемы взрывания модельных блоков, состоящие из разных по крепости пород, с неизменными параметрами расположения зарядов (верхний ряд) и измененными расстояниями между зарядами с учетом прочностных характеристик блоков (нижний ряд)

Взрывы моделей осуществлялись при помощи пятиканального генератора импульсов с использованием короткозамедленного взрывания путем разряда конденсаторов на пиротехнические взрыватели (Рис. 3) (Ekvist & Vartanov, 2006).

Максимальное напряжение, до которого заряжаются конденсаторы генератора 260 В. В пятиканальном генераторе емкость конденсатора в каждом из пяти каналов 3000 мкФ. Остаточное напряжение после имитации взрыва равно 50 В. Выделенная энергия при разряде конденсатора одного канала в пятиканальном генераторе:

$$W_{взр} = \frac{CU^2}{2} - \frac{CU_{ост}^2}{2} = \frac{3000 \cdot 10^{-6} \cdot 260^2}{2} - \frac{3000 \cdot 10^{-6} \cdot 50^2}{2} = 101.4 - 3.75 = 97.65 \text{ Дж}, \quad (1)$$

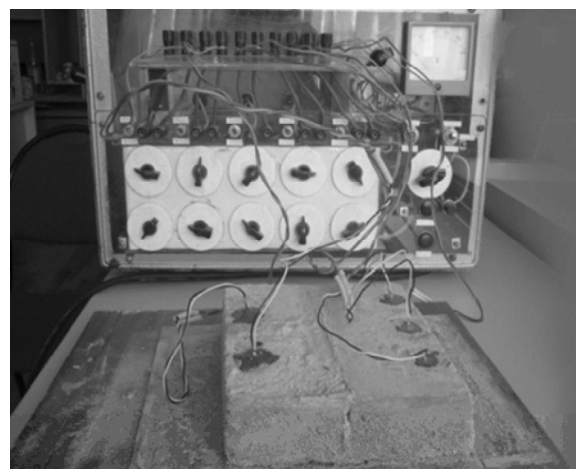


Рисунок 3. Пятиканальный генератор импульсов и модель взрываемого блока

где:

$W_{взр}$ – энергия, выделенная при имитации действия взрыва, Дж;

C – емкость конденсатора, Ф;

U – напряжение, до которого заряжается конденсатор, В;

$U_{ост}$ – напряжение, которое осталось на конденсаторах после имитации взрыва, В.

Выделенная энергия может быть уменьшена снижением напряжения, до которого заряжаются конденсаторы. Для увеличения мощности взрыва одного заряда каждый конденсатор разряжался на пиротехнический взрыватель, вставленный в отверстие модельного блока. Тогда мощность взрыва одного заряда:

$$W = W_{взр} + W_{нпр} = 97.65 + 300 = 397.65, \text{ Дж}, \quad (2)$$

где:

$W_{нпр} = 300$ – энергия взрыва пиротехнического взрывателя, Дж.

Общая максимальная энергия $W_{общ}$, которая получена при имитации взрыва:

$$W_{общ} = 5 \cdot 97.65 + 5 \cdot 300 = 1988.25. \quad (3)$$

Чтобы эксперимент в лабораторных условиях приближался к натурным исследованиям, взрывы в менее прочной части блоков происходили одновременно в первую очередь, а затем через 5 мс происходили одновременно взрывы в более прочной части модельных блоков.

При приближении эксперимента в лабораторных условиях к натурным исследованиям взрывы проходили одновременно вначале в менее прочной части блоков, а затем через 5 мс – в более прочной части. Лабораторные исследования включают в себя три серии опытов с различной вариацией изменения прочностных характеристик моделей блоков. В каждой изготавливалось по две модели образцов: одна взрывалась одновременно зарядами без учета изменения физико-технических свойств пород блока, а вторая – с учетом меняющихся свойств, т.е. с изменением расстояния между зарядами и их количеством, а также с замедлением 5 мс между взрывами в более прочной части моделей относительно взрывов в менее прочной части.

В первой серии опытов (Рис. 4а) граница раздела пород проходила по центру блока, во второй (Рис. 4б) 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. 4в) граница раздела крепости пород была смещена в одном случае в сторону крепких пород, а в другом – в сторону слабых.

По опытным данным проводилась оценка качества дробления породы. В качестве критериев эффективности дробления приняты выход крупных фракций и средний размер кусков раздробленных образцов.

Такие вариации расположения твердых пород в образцах, имитировавших сложноструктурный взрываваемый массив, позволили оценить эффективность изменения параметров БВР в зависимости от геомет-

рии включений и объемов разрушения крепких и слабых пород. Так как прочностные характеристики пород влияют на выбор параметров взрывных работ, то эти параметры напрямую будут зависеть от изменения свойств горных пород. 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 линия наименьшего сопротивления до границы раздела пород соответствовала радиусу регулируемого дробления (Ekvist & Vartanov, 2006).

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 разрушающее действие взрывов зарядов в них. Таким образом происходит более интенсивное дробление твердых пород в массивах со сложной геологической структурой (Netleton, 1989; Kutuzov, Ekvist, & Bragin, 2008; Hosseini & Baghikhani, 2013; Hiyeu, Ahn, Fuk, & Belin, 2015).

На Рисунке 5 приводится сравнение выхода крупных фракций при взрыве слабых и крепких пород 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 взрывных работ наблюдается более равномерное дробление как слабых пород, так и крепких включений и увеличение выхода средних фракций.

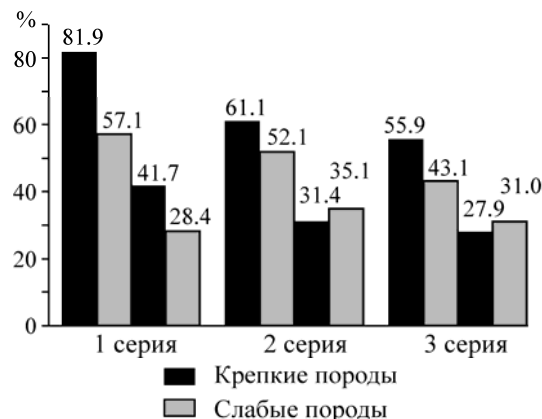


Рисунок 5. Гистограмма выхода крупных фракций в зависимости от свойств образцов: две первые колонки при неизменных параметрах взрыва, две следующие – при измененных

При плавном изменении свойств необходимо учитывать градиент их изменения в пространстве (Рис. 6). Картину изменения свойств взрывааемых пород можно составить на основе георадиолокационных просвечиваний используя, к примеру, георадары серии “ОКО” (Kulizhnikov, Burda, & Belozergov, 2004; Semeykin, Pomozov, Ekvist, & Monakhov, 2008; Alenichev, 2016).

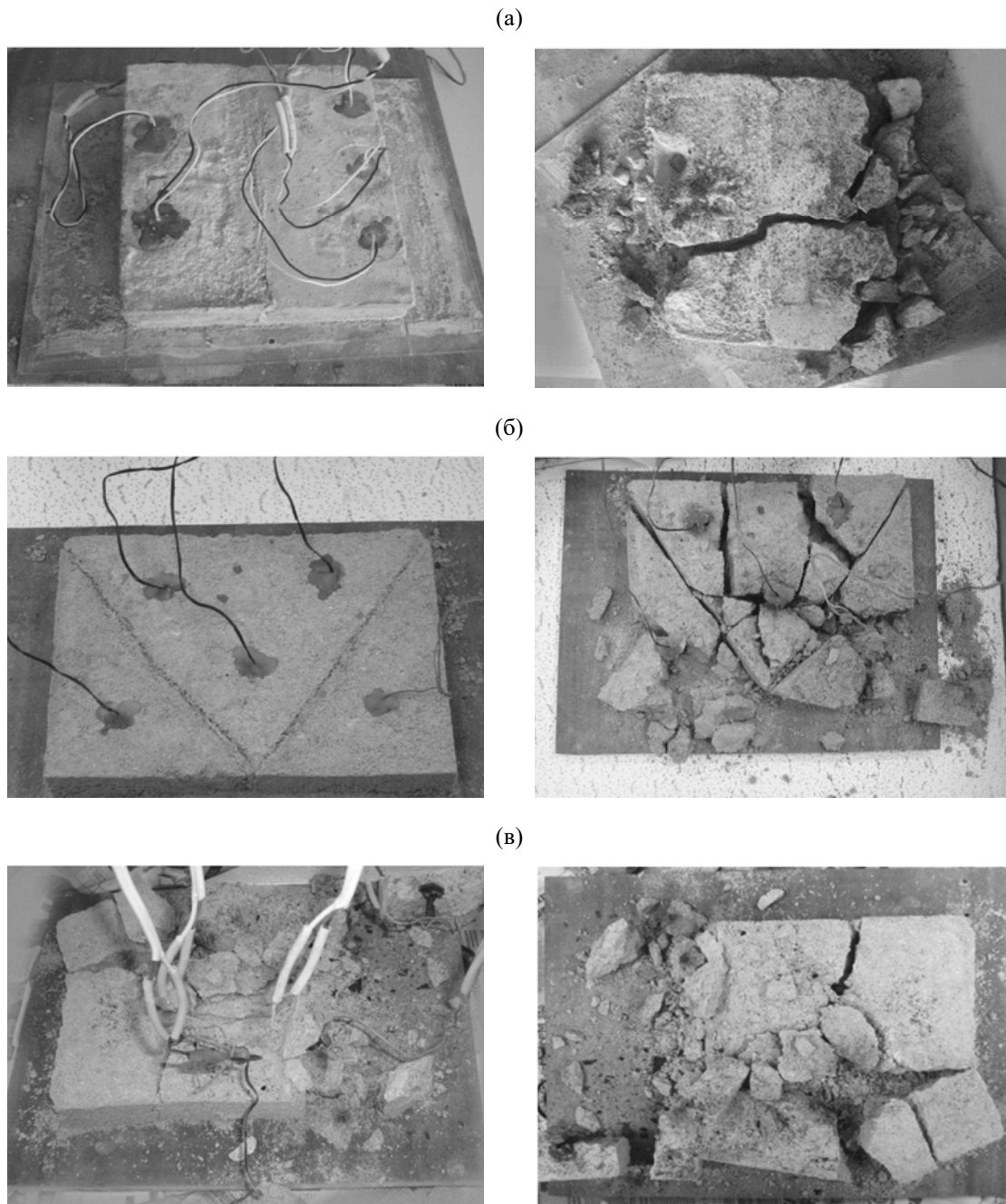


Рисунок 4. Серия опытов: (а) первая; (б) вторая; (в) третья

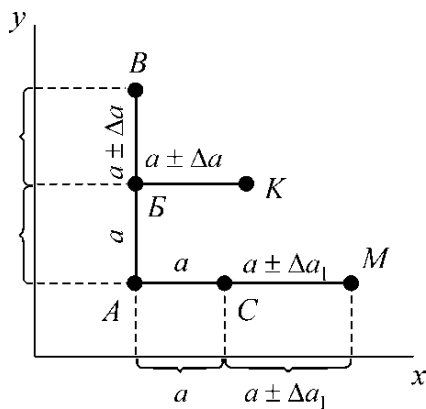


Рисунок 6. Разбивка взрываемого блока зарядами взрывающего вещества

На Рисунке 5 показана разбивка взрываемого блока зарядами ВВ. Точки A, B, C, B, M, K – места расположения зарядов. Допустим в точке A крепость f , ей соответствует расстояние между скважинными зарядами a и замедление t . Откладываем по оси y расстояние a , по оси x также расстояние a . В точке B крепость f_1 , ей соответствует расстояние между зарядами $a \pm \Delta a$. Плюс, если крепость $f_1 \leq f$, минус, если $f_1 > f$. Замедление между точками B и $B - t \pm \Delta t$. Плюс, если крепость $f_1 \leq f$, минус, если $f_1 > f$. Аналогично в точке C крепость f_2 , ей соответствует расстояние между зарядами $a \pm \Delta a_1$. Плюс, если крепость $f_2 \leq f$, минус, если $f_2 > f$. Замедление между точками C и $M - t \pm \Delta t_1$. Плюс, если крепость $f_2 \leq f$, минус, если $f_2 > f$. Величины $\Delta a, \Delta a_1$ и $\Delta t, \Delta t_1$ тем больше, чем больше градиент крепости породы. Для следующих точек B, K, M и т.д. действия аналогичны.

3. ВЫВОДЫ

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

Выполненные лабораторные эксперименты подтверждают эффективность изменения параметров буровзрывных работ в зависимости от геологических особенностей неоднородного массива.

Предложена методика взрывания массивов пород на основе их георадиолокационных просвечиваний.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор приносит благодарность разработчикам георадаров серии “Око” предприятия “Логис”, в частности генеральному директору Н.П. Семейкину.

REFERENCES

Alenichev, I.A. (2016). Korrektirovka udel'nogo raskhoda vzryvchatogo veshchestva. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'*, (7), 364-373.

Ekvist, B.V., & Vartanov, V.G. (2006). *Laboratornyy praktikum po distsipline "Tekhnologiya i bezopasnost' vzryvnykh rabot"*. Moskva: Gornaya kniga.

Gorokhov, N.L. (2011). The Mathematical Formulation and Numerical Implementation of Dynamic Problems of Geo-

mechanics Using Finite Element Method. *Scientific Reports on Resource Issues*, (1), 205-211.

Hiyeu, C.K., Ahn, N.D., Fuk, N.V., & Belin, V.A. (2015). Pilot Studies of Influence of Diameter of Explosive Wells on Seismic Action of Explosions on Nuybeo Coal Mine. In *Explosive Technologies* (pp. 252-255). Hanoi: NTU.

Hosseini, M., & Baghikhani, M.S. (2013). Analysing the Ground Vibration Due to Blasting at AlvandQoly Limestone Mine. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, 2(2), 17-23. <https://doi:10.5923/j.mining.20130202.01>

Kulizhnikov, A.M., Burda, S.N., & Belozarov, A.A. (2004). Primenenie georadarov dlya razvedki i otsenki zapasov dorozhno-stroitel'nykh materialov. *Gornyy Zhurnal*, (3), 86-87.

Kutuzov, B.N., Ekvist, B.V., & Bragin, P.A. (2008). Sravnitel'naya otsenka seysmicheskogo vozdeystviya vzryva skvazhinnykh zaryadov pri ispol'zovanii sistemy neelektricheskogo initsirovaniya i elektrodetonatorov s elektronnyim zamedleniem. *Gornyy Zhurnal*, (12), 44-46.

Kutuzov, B.N. (2009). *Metody vedeniya vzryvnykh rabot. Razrushenie gornyykh porod vzryvom*. Moskva: Gornaya kniga.

Netleton, M. (1989). *Protsessy detonatsii*. Moskva: Mir.

Semeykin, N.P., Pomozov, V.V., Ekvist, B.V., & Monakhov, V.V. (2008). Geofizicheskie pribory novogo pokoleniya. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'*, (12), 203-210.

Sovmen, V.K., Kutuzov, B.N., Mar'yasov, A.L., Ekvist, B.V., & Tokarenko, A.V. (2012). *Seysmicheskaya bezopasnost' pri vzryvnykh rabotakh*. Moskva: Gornaya kniga.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Изучение качества дробления массива пород с разными прочностными свойствами в зависимости от параметров расположения зарядов и времени взрывания.

Методика. На основе разрушения лабораторных образцов построение гистограмм гранулометрического состава и анализ их в зависимости от расположения зарядов и времени взрыва.

Результаты. Получены закономерности гранулометрического состава в зависимости от расположения зарядов и времени взрыва.

Научная новизна. Доказано улучшение дробления от взрывов зарядов с измененными параметрами в зависимости от прочностных свойств образцов.

Практическая значимость. Предложен способ изменения расположения зарядов и времени их взрывов в зависимости от структуры массива, полученной, в частности, при его просвечивании георадаром.

Ключевые слова: сложноструктурные массивы, георадар, георадиолокация, градиент, прочностные свойства пород, параметры буровзрывных работ, результаты взрывов

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Вивчення якості дроблення масиву порід з різними властивостями міцності в залежності від параметрів розташування зарядів і часу вибуху.

Методика. На основі руйнування лабораторних зразків побудова гістограм гранулометричного складу та їх аналіз в залежності від розташування зарядів і часу вибуху.

Результати. Отримано закономірності гранулометричного складу в залежності від розташування зарядів і часу вибуху.

Наукова новизна. Доведено поліпшення дроблення від вибухів зарядів зі зміненими параметрами в залежності від міцнісних властивостей зразків.

Практична значимість. Запропоновано спосіб зміни розташування зарядів і часу їх вибухів в залежності від структури масиву, отриманої, зокрема, при його просвічуванні георадаром.

Ключові слова: складноструктурні масиви, георадар, георадіолокація, градієнт, міцнісні властивості порід, параметри буровибухових робіт, результати вибухів

ARTICLE INFO

Received: 10 June 2017

Accepted: 8 September 2017

Available online: 30 September 2017

ABOUT AUTHORS

Boris Ekvist, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Physical Processes of Mining and Geocontrol Department, National University of Science and Technology "MISiS", 6 Leninskiy Ave., 119991, Moscow, Russia. E-mail: borisekwist@mail.ru