

А.В. Лещинский, Е.Б. Шевкун, Ю.А. Лысак

ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПРЕДРАЗРУШЕНИЕ МАССИВА СКАЛЬНЫХ ПОРОД

Аннотация. Поставлена задача определения интенсивности ослабления массива в районе каждой взрывающейся скважины в ходе развития массового взрыва в горном массиве в зависимости от размера зон предварительного разлома. Процесс хрупкого разрушения пород взрывом происходит под действием растягивающих напряжений от действия волны сжатия в фазе разрежения. Это приводит к образованию систем трещин, прорезающих массивы горных пород. Повторная взрывная нагрузка горной массы способствует образованию дополнительных поверхностей обнажения, увеличению соударений потоков взорванной породы. Задача решается графоаналитическим методом. Волна напряжений распространяется в горной породе дальше границ взрывной полости. При этом происходит предварительное разрушение окрестностей окружающих скважин. Изменение величины деформации по мере удаления от оси взрывающейся скважины учитывается коэффициентом интенсивности предварительного разрушения породы. Коэффициент интенсивности при достижении предельной деформации взрывной полости скважины равен единице. Это значит, что взрывная полость скважины полностью разрушена. Приведены данные для сравнения результатов расчета предварительного разрушения при диагональных схемах взрывания с опережающим взрыванием скважин средних рядов и с опережающим взрыванием скважин крайних рядов. Анализ данных показывает, что при использовании схемы взрывания с опережающим взрыванием скважин крайних рядов количество предразрушений больше на 30%, а суммарная интенсивность предразрушения — на 55,4%. Сочетание поскважинного взрывания и увеличенных интервалов замедления позволяет повысить качество дробления горной массы. Используя способность определять предварительное разрушение окрестностей скважин всего взрывного блока, можно выбрать предпочтительную схему взрывания для полезного ископаемого и пустой породы.

Ключевые слова: опережающее разрушение горных пород, увеличенные интервалы задержки, одиночные взрывные скважины, образование систем трещин, сжимающие и растягивающие силы в горных породах.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-50-57

Введение

Процесс хрупкого разрушения горных пород взрывом с физической точки зрения характеризуется одним видом разрушения — отрывом под действием растягивающих напряжений от действия волны сжатия в фазе разрежения. Это и приводит к образованию систем трещин, рассекающих массивы горных пород [1, 2]. Качественные показатели взрывов

на карьерах Навоийского ГМК с применением неэлектрических систем инициирования типа ИСКРА характеризуются компактной формой развала взорванной горной массы, что способствует снижению потерь и разубоживания; уменьшением выхода крупнокусковых фракций горной массы; улучшением качества проработки подошвы уступа и снижением сейсмического эффекта. Улучшение

перечисленных показателей в работе [3] объясняют многократным взрывным нагружением массива горных пород при реализации принципа «одно замедление — одна скважина», что способствует образованию дополнительных поверхностей обнажения, увеличению соударений потоков взорванной породы. Именно сочетание принципа «одно замедление — одна скважина» и увеличенных интервалов замедления позволяет повысить качество дробления горной массы. Однако при этом масса конкретных скважинных зарядов не связана с изменением свойств пород в зонах предразрушения при развитии массового взрыва.

Проблема управления энергией взрыва при дроблении горных пород является важнейшим компонентом в технологии открытой разработки месторождений полезных ископаемых. За последние годы, благодаря пристальному вниманию ученых, инженеров и практиков взрывного дела, к проблемам изучения физических основ действия промышленных взрывов в горных породах, по улучшению технологии и созданию инженерных методов управления энергией взрыва, успешно решены многие сложные вопросы. Одно из направлений исследования включает работы по короткозамедленному взрыванию, взрыванию в зажатой среде, с внутрискважинным замедлением и т.д. [4–6].

Таким образом, ставится задача определения интенсивности ослабления массива в районе каждой взрываемой скважины в процессе развития массового взрыва в реальном массиве горных пород на основе учета размеров зон предразрушения и использование ее при расчете параметров зарядов конкретных скважин.

Методы

Процесс разрушения горных пород взрывом исследовался многими учены-

ми [7–9]. С учетом всего достигнутого, действие взрыва на горную породу рассматривается как на хрупкое разрушение упругой плоской среды — плоская задача, решение которой доводится до определения требуемого удельного расхода взрывчатого вещества [10]. Поскольку длина заряда на несколько порядков превышает его диаметр, а вызываемые в породе смещения от действия скважинного заряда обладают осевой симметрией, характер действия заряда предложено определять решением плоской (двухмерной) задачи.

Величина деформации ε_{np} взрывной полости, ограниченной радиусом r , может быть определена по формуле [10, 11]:

$$\varepsilon_{np} = \sqrt{\frac{2\rho_0 D^2}{E(K-1)\left(1 + \frac{4\pi^2}{1+\nu}\right)}},$$

где ρ_0 — плотность ВВ, кг/м³; η — коэффициент полезного действия взрыва; D — скорость детонации, м/с; E — модуль Юнга, Па; K — показатель политропы; ν — коэффициент Пуассона, Па.

Волна напряжений распространяется дальше границ взрывной полости, осуществляя предразрушение окрестностей окружающих скважин. Величина деформации (предразрушения) окрестностей этих скважин определится по формуле

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{np} K_{и} = \varepsilon_{np} \left(\frac{r}{R_i}\right)^2,$$

где ε_i — величина деформации окрестностей i -ой скважины; $K_{и}$ — коэффициент интенсивности, учитывающий изменение величины деформации по мере удаления от оси взрывающей скважины; R_i — расстояние от оси i -ой скважины до взрывающей.

Коэффициент $K_{и}$ при достижении предельной деформации взрывной полости скважины ε_{np} равен единице, т.е. взрывная полость скважины полностью разрушена.

Из всего многообразия применяемых схем взрывания (более 50) наиболее широко распространены диагональная и клиновая (в процессе развития переходящая в диагональную) схемы взрывания. Используя возможность определения предварительного разрушения окрестностей скважин всего взрываемого блока, можно выбрать предпочтительную схему взрывания и рассчитать требуемый расход ВВ.

Для примера рассмотрим взрывание в «зажатой среде» — взрывание в условиях недостаточности или отсутствия боковых свободных поверхностей на взрывном блоке. Примерами взрывания в зажатой среде являются взрывы при резке нового горизонта и так называемые траншейные взрывы.

Сравним две диагональные схемы взрывания: с опережающим взрыванием скважин средних рядов (рис. 1, а) и с опережающим взрыванием скважин крайних рядов (рис. 1, б). Для этого воспользуемся следующим методом определения интенсивности предварительного разрушения окрестностей взрывных скважин.

Радиус зоны разрушения r может достичь предельной величины в 40 радиусов заряда (R_z) [12]. Для расчета взаимодействия зон предразрушения радиус зоны разрушения принимаем $r = 2,8$ м. Сетка скважин 4×4 м. Инициирование поверхностной сети скважинных зарядов блока проводим от скважины 1.

При опережающем взрывании скважин 1, 2, 4, 7, 10 среднего ряда (рис. 1, а) волна напряжений от взрывов скважин, расположенных слева от среднего ряда, гасится в разрушенной породе окрестностей скважин среднего ряда и не вызывает предразрушения окрестностей скважин, расположенных справа от среднего ряда, и наоборот, волна напряжений от взрывов скважин, расположенных справа от среднего ряда, гасится в разрушенной породе окрестностей скважин среднего ряда.

При опережающем взрывании скважин крайних рядов (рис. 1, б) волна напряжений от взрывов скважин, расположенных в крайних рядах, гасится в разрушенной породе окрестностей скважин среднего ряда.

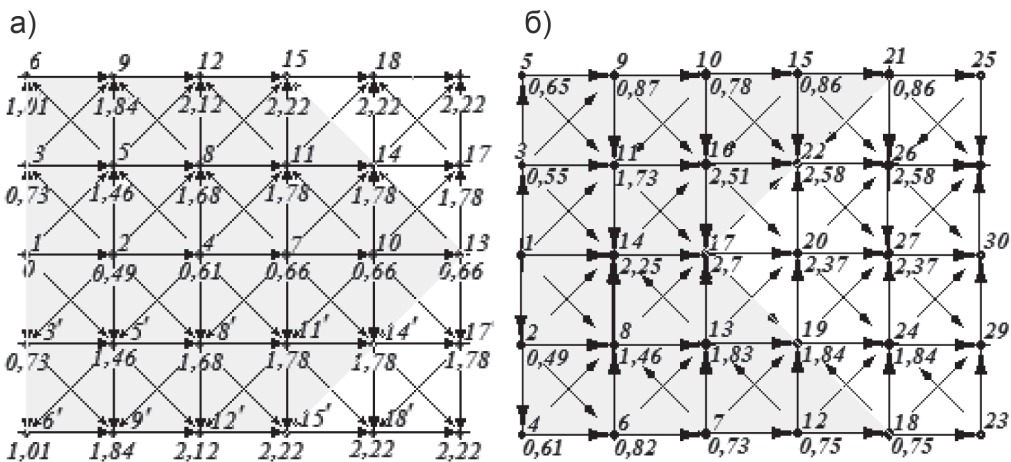


Рис. 1. Диагональные схемы взрывания: с опережающим взрыванием скважин средних рядов (а); с опережающим взрыванием скважин крайних рядов (б). Над скважиной указан ее номер по порядку взрывания; под скважиной — величина суммарного коэффициента интенсивности предразрушения окрестностей этой скважины от взрыва соседних скважин с опережающим взрыванием скважин боковых рядов

Fig. 1. Diagonal scheme: with advanced blasting of wells located in the middle rows (a); with advanced blasting of wells located in the extreme rows (b). Over the well is identified by its number in sequence of explosion; under the well — the value of total coefficient of intensity of predestruction of neighborhoods this well from the explosion of neighboring wells

Количество и интенсивность предразрушений в зависимости от схемы взрывания
The amount and intensity of preliminary destruction depending on the scheme of blasting

Схема взрывания	Суммарное количество предразрушений в 22 скважинах	Суммарная интенсивность предразрушений в 22 скважинах
С опережающим взрыванием скважин средних рядов	112	27,44
С опережающим взрыванием скважин крайних рядов	146	42,64

него ряда. После взрыва 12-й скважины нарастание предразрушения в последующих скважинах блока не наблюдается.

Скважины 2-го ряда имеют $K_{и}$ со значением 1,46–1,78, т.е. величина заряда ВВ для разрушения окрестностей этих скважин может быть значительно уменьшена.

Окрестности скважин крайних рядов имеют $K_{и}$ со значением 1,01–2,22, т.е. имеют большое предразрушение.

Если крайний ряд скважин находится у конечного борта, то взрывание этих скважин полным зарядом ВВ может привести к переотбойке и слишком затронет конечный борт.

Если же крайний ряд скважин находится у верхней бровки взрываемого блока, то взрывание этих скважин полным зарядом приведет к выбросу горной массы и малой эффективности дробления ее зарядом этой скважины.

При опережающем взрывании скважин 1, 2, 4, 7, 10 и 1', 2', 4', 7', 10' крайних рядов (рис. 1, б) волна напряжений пойдет от периферии к середине взрываемого блока. При этом разрушенная порода ранее взорванных скважин не гасит волну напряжений, что способствует предразрушению окрестностей всех скважин блока.

После взрыва 12 и 12' скважин нарастание предразрушения в последующих скважинах блока не наблюдается.

Значение коэффициента $K_{и}$ для скважин средних рядов 1,51–3,08, т.е. вели-

чина заряда ВВ для разрушения окрестностей этих скважин может быть значительно уменьшена.

$K_{и}$ в окрестностях скважин крайних рядов равен 0,49–1,30, такие скважины имеют достаточное предразрушение, если крайний ряд скважин находится у конечного борта, то взрывание этих скважин полным зарядом ВВ может привести к переотбойке и затронет конечный борт.

Если крайний ряд скважин находится у рабочего борта, то взрывание этих скважин полным зарядом ВВ способствует предразрушению породы рабочего борта.

Если же крайний ряд скважин находится у верхней бровки взрываемого блока, то взрывание этих скважин полным зарядом приведет к выбросу горной массы и малой эффективности дробления ее зарядом этой скважины.

Результаты

В таблице приведены данные для сравнения результатов расчета предразрушений при диагональных схемах взрывания с опережающим взрыванием скважин средних рядов и с опережающим взрыванием скважин крайних рядов. Расчеты проводились для первых 22-х взорванных скважин, т.к. после взрыва этих скважин нарастание предразрушения в последующих скважинах блока не наблюдается.

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что при использова-

нии схемы взрывания с опережающим взрыванием скважин крайних рядов количество предразрушений больше на 30%, а суммарная интенсивность предразрушения — на 55,4%.

Обсуждение

Как уже отмечалось, коэффициент $K_{и}$ при достижении предельной деформации взрывной полости скважины $\varepsilon_{пр}$ равен единице, т.е. взрывная полость скважины полностью разрушена. Приведенные на рис. 1 значения суммарных коэффициентов интенсивности разрушения показывают, что практически по всему объему взрываемого блока предварительное разрушение породы еще до взрыва скважин больше единицы, т.е. окрестности взрываемых скважин полностью разрушены. При этом взорванная горная масса значительно переизмельчается. Такой эффект полезен при добыче полезных ископаемых, когда взорванная горная масса отправляется на обогатительную фабрику для последующего дробления и помола.

При взрывании пустой породы такое переизмельчение ведет к излишнему

расходу взрывчатых материалов, бурового инструмента и пр. Для этого случая предлагается увеличить сетку скважин следующим образом.

Рассмотрим ячейку сетки взрывных скважин с размером стороны, равным a (рис. 2).

На разрушение породы в точке O влияет в первую очередь взрыв от скважин, окружающих ее. Чтобы получить коэффициент предразрушения $K_{и}$, равный единице, он складывается из величин коэффициентов предразрушения от взрыва каждой из четырех окружающих скважин, равных 0,25 [10].

Коэффициент предразрушения от каждой скважины равен

$$K_{и} = 0,25 = \left(\frac{r}{R}\right)^2. \quad (1)$$

Принимаем сетку скважин с квадратными ячейками со стороной, равной a .

$$R = \frac{a}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

отсюда $a = R\sqrt{2}$.

Подставляем в выражение (1), получаем

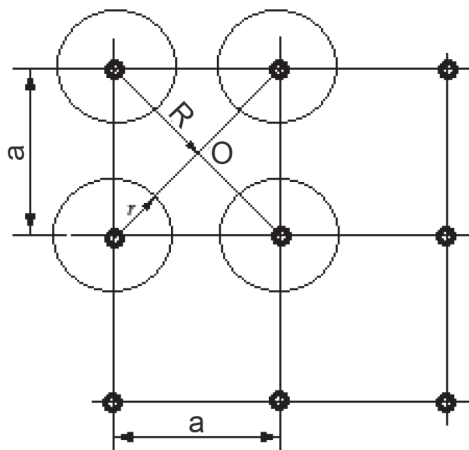


Рис. 2. Схема для определения максимального размера сетки скважин, обеспечивающего разрушение окрестностей взрывных скважин

Fig. 2. The scheme for determining the maximum size of the grid of wells, ensuring the destruction of the vicinity of explosive wells

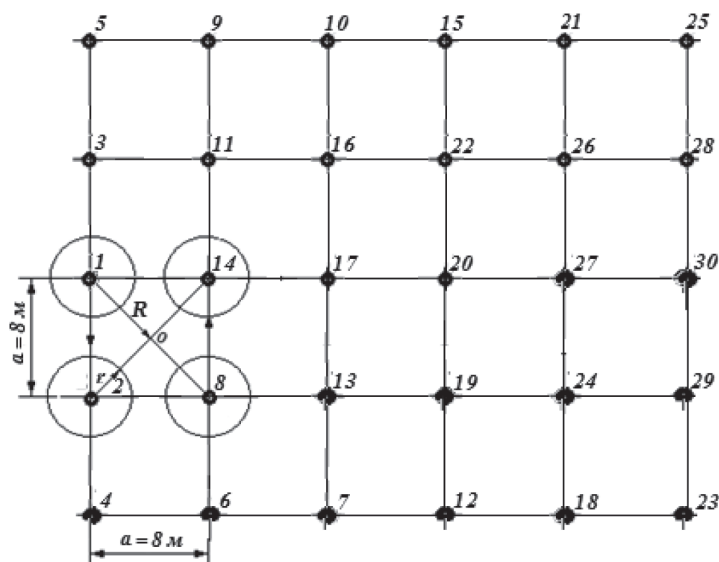


Рис. 3. Диагональная схема иницирования зарядов ВВ с опережающим взрыванием скважин крайних рядов с сеткой 8×8 м

Fig. 3. Diagonal scheme of initiation of explosive charges with advanced blasting of wells located in the extreme rows with a grid of 8×8 m

$$a = \sqrt{\frac{2r^2}{0,25}} = 2,83r .$$

Так, например, если принять, как и в предыдущем расчете, $r = 2,8$ м, длина стороны a равна 8 м (рис. 3).

Как следует из вышеприведенных расчетов, весь объем горного массива полностью разрушается, поскольку коэффициент интенсивности предразрушения везде равен единице. Достоинством такой схемы взрывания является то, что при одинаковой площади взрываемого блока бурится значительно меньше скважин.

Например (рис. 3), на блоке 32×40 м при сетке 8×8 м бурится 30 скважин, а при сетке 4×4 м пришлось бы бурить 99 скважин. А так как заряд ВВ в скважинах при разных сетках одинаков, то и расход взрывчатки при сетке 8×8 в 3,3 раза меньше.

Дальнейшие исследования заключаются в проверке изложенных теоретических положений в реальных условиях в карьерах Дальнего Востока с использованием системы автоматизированного проектирования буровзрывных работ «Blast Maker».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снитка Н. П., Мислибоев И. Т., Каримов Ё. Л. Разработка энергосберегающей технологии ведения буровзрывных работ в зоне ослабления прочности горного массива на глубоких карьерах // Горный вестник Узбекистана. — 2015. — № 2 (61). — С. 7–11.
2. Xiaodong Fu, Qian Sheng, Yonghui Zhang, Jian Chen Application of the discontinuous deformation analysis method to stress wave propagation through a one-dimensional rock mass. — International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 80. December 2015, Pp. 155–170.
3. Рубцов С. К., Ершов В. П. Применение неэлектрических систем иницирования на карьерах Навоийского ГМК / Физические проблемы разрушения горных пород: Сборник тру-

дов Четвертой международной научной конференции, 18–22 октября 2004 г. — М., 2005. С. 387–391.

4. Норов Ю. Д., Очилов Ш. А. Проблема управления дроблением горных пород под действием энергии взрыва скважинных зарядов взрывчатых веществ на открытых горных работах // Горный вестник Узбекистана. — 2016 — № 4 (67). — С. 17–23.

5. Юровских А. В. Разработка модели разрушения горных пород на квазистатической стадии действия взрыва: Дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20. — СПб., 2003. — 119 с.

6. *Bangbiao Wu, Rong Chenc, Kaiwen Xia.* Dynamic tensile failure of rocks under static pre-tension // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 80. December 2015. Pp. 12–18.

7. *Akande J. M., Lawal A. I.* Optimization of Blasting Parameters Using Regression Models in Ratcon and NSCE Granite Quarries. — Ibadan, Oyo State, Nigeria // Geomaterials. 2013. Vol. 3. No 1. Pp. 28–37.

8. *Cunningham C. V. B.* Control over Blasting Parameters and Its Effect on Quarry Productivity. — Rondebosch: AECI Explosives and Chemical Limited. 2011.

9. *Momeni A., Karakus M., Khanlari G. R., Heidari M.* Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 77, July 2015, Pp. 89–96.

10. *Штукарин Н. Г.* Физика взрыва в прикладных задачах. — Красноярск: Ситалл, 2010. — 309 с.

11. *Суханов А. Ф., Назаров П. П., Дмитриев А. П. и др.* Буровзрывные работы. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. — 242 с.

12. *Снитка Н. П., Назаров З. С.* Определение радиуса зон трещинообразования горного массива взрывами камуфлетного заряда // Горный вестник Узбекистана. — 2014. — № 4 (59). — С. 55–56. **ТИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Лещинский Александр Валентинович*¹ — доктор технических наук, профессор, доцент, e-mail: 000399@pnu.edu.ru,

*Шевкун Евгений Борисович*¹ — доктор технических наук, профессор, доцент, e-mail: ev.shevkun@yandex.ru,

Лысак Юрий Алексеевич — генеральный директор, ООО «АВТ-Амур», e-mail: Lysak-y@pokrmine.ru,

¹ Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ).

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2019. No. 2, pp. 50–57.

The effect of direction of initiation of charges explosives for rock microcracking solid rock

*Leschinsky A.V.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Assistant Professor, e-mail: 000399@pnu.edu.ru,

*Shevkun E.B.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Assistant Professor, e-mail: ev.shevkun@yandex.ru,

Lysak Yu.A., General Director, e-mail: Lysak-y@pokrmine.ru, Open Company «AVT-Amur», 675000, Blagoveshchensk, Russia.

¹ Pacific National University, 680035, Khabarovsk, Russia.

Abstract. The article poses the problem of determining the intensity of the weakening of the array in the area of each exploding well in the course of the development of a massive explosion in the rock massif based on the size of the preliminary fracture zones. The process of brittle fracture of rocks by an explosion occurs under the action of tensile stresses from the action of a compression wave in the rarefaction phase. This leads to the formation of systems of cracks, cutting through the rock mass. The problem is solved by the graphical-analytical method. The stress wave propagates in the rock beyond the boundaries of the

explosive cavity. When this occurs, pre-the destruction of neighborhoods surrounding wells. The change in the deformation value as it moves away from the axis of the exploding well is taken into account by the intensity factor of the preliminary destruction of the rock. The intensity factor when the maximum deformation of the explosive cavity of the well is equal to one. This means that the explosive cavity of the well of blasting each well separately and extended deceleration intervals that can improve the quality of crushing of the rock mass. Using the ability to determine the preliminary destruction of the vicinity of the wells of the entire explosive block, you can choose the preferred blasting scheme for minerals and waste rock. The data for comparison of the results of calculation preliminary destruction of the diagonal blasting schemes with advanced blasting of wells located in the middle rows, and with advanced blasting of wells located in the extreme rows. Analysis of the data shows that when using the scheme of explosion with advanced blasting of wells of extremes rows, the number of preliminary destructions is more by 30%, and the total intensity of preliminary destruction — by 55.4 %

Key words: advanced rock destruction, increased intervals of delay, single blasting boreholes, the formation of systems of cracks, the compressive and tensile forces in the rock.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-50-57

REFERENCES

1. Snitka N.P., Misliboev I.T., Karimov E.L. Razrabotka energosberegayushchey tekhnologii vedeniya burovzryvnykh rabot v zone oslableniya prochnosti gornogo massiva na glubokikh kar'erakh [Development of energy-saving technology for drilling and blasting operations in the area of weakening the strength of the rock mass in deep quarries], *Gornyy vestnik Uzbekistana*. 2015, no 2 (61), pp. 7–11. [In Russ].
2. Xiaodong Fu, Qian Sheng, Yonghui Zhang, Jian Chen Application of the discontinuous deformation analysis method to stress wave propagation through a one-dimensional rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 80. December 2015, pp. 155–170.
3. Rubtsov S.K., Ershov V.P. Primenenie neelektricheskikh sistem initsirovaniya na kar'erakh Navoiyskogo GMK [Application of non-electric initiation systems in the quarries of Navoi MMC]. *Fizicheskie problemy razrusheniya gornyx porod: Sbornik trudov Chetvertoy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*, 18–22 October 2004, Moscow, 2005, pp. 387–391. [In Russ].
4. Norov Yu.D., Ochilov Sh.A. Problema upravleniya drobлением gornyx porod pod deystviem energii vzryva skvazhinnykh zaryadov vzrychatykh veshchestv na otkrytykh gornyx rabotakh [The problem of managing the crushing of rocks under the action of the energy of the blast hole charges of explosives in open-pit mining], *Gornyy vestnik Uzbekistana*. 2016, no 4 (67), pp. 17–23. [In Russ].
5. Yurovskikh A.V. *Razrabotka modeli razrusheniya gornyx porod na kvazistaticheskoy stadii deystviya vzryva* [Development of a model of rock destruction at the quasi-static stage of the explosion], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2003, 119 p.
6. Bangbiao Wua, Rong Chenc, Kaiwen Xia. Dynamic tensile failure of rocks under static pretension. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 80. December 2015. Pp. 12–18.
7. Akande J.M., Lawal A.I. Optimization of Blasting Parameters Using Regression Models in Ratcon and NSCE Granite Quarries. Ibadan, Oyo State, Nigeria. *Geomaterials*. 2013. Vol. 3. No 1. Pp. 28–37.
8. Cunningham C.V. B. *Control over Blasting Parameters and Its Effect on Quarry Productivity*. Rondebosch: AECI Explosives and Chemical Limited. 2011.
9. Momeni A., Karakus M., Khanlari G.R., Heidari M. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 77, July 2015, Pp. 89–96.
10. Shtukarin N.G. *Fizika vzryva v prikladnykh zadachakh* [Physics of explosion in applied problems], Krasnoyarsk, Sitall, 2010, 309 p.
11. Sukhanov A.F., Nazarov P.P., Dmitriev A.P. *Burovzryvnye raboty* [Drilling and blasting operations], Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1958, 242 p.
12. Snitka N.P., Nazarov Z.S. Opredelenie radiusa zon treshchinoobrazovaniya gornogo massiva vzryvami kamufletnogo zaryada [Definition of radius of zones of fracturing of the massif explosions camouflet charge], *Gornyy vestnik Uzbekistana*. 2014, no 4 (59), pp. 55–56. [In Russ].

