

Код МРНТИ 52.13.21

\*А.А. Орынбай, А.Е. Алибаев, Т.С. Ибырханов

*Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан)*

## РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БВР, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ НАИМЕНЬШИЕ ЗАТРАТЫ НА ДОБЫЧУ И ПЕРЕРАБОТКУ РУДЫ

**Аннотация.** Отгрузка разрушенной горной массы требуемого качества и количества на обогащающую фабрику является одной из основных задач подготовительных работ при добыче полезных ископаемых. Основным способом регулирования этого процесса является оптимизация параметров и технологий ведения буровзрывных работ. На Актогайском месторождении возникла проблема с увеличением крепости добываемой руды по мере углубления карьера, что сильно влияет на производительность обогащающей фабрики. В статье приведен опыт проведения мероприятий по оптимизации БВР для улучшения работы обогащающей фабрики, а точнее стабилизации процесса первичного дробления руды. В статье приведены методы расчета рациональных параметров и результатов БВР. Проведен расчет рациональных параметров БВР, а также расчет гранулометрического состава взорванных пород при рациональных параметрах и при предложенных для экспериментальных взрывов.

**Ключевые слова:** *ключевые результаты взрыва, буровзрывные работы, рациональные параметры, первичное дробление, грансостав, сужение сетки.*

### Кен өндіру және өндеу шығындарын азайтатын бұрғылау-жару жұмыстарының тиімді параметрлері

**Андатпа.** Қажетті сападағы және көлемдегі бұзылған тау жынысын байыту фабрикасына жөнелту пайдалы қазбаларды өндіруге дайындық жұмыстарындағы негізгі міндеттердің бірі болып табылады. Бұл процесі реттеудің негізгі әдісі бұрғылау-жару жұмыстарының параметрлері мен технологияларын оңтайландыру болып табылады. Ақтоғай кен орнында карьердің тереңдеуімен өндірілетін кеннің беріктігінің артуы проблемасы туындады, бұл байыту фабрикасының өнімділігіне айтарлықтай әсер етеді. Мақалада байыту фабрикасының жұмысын жақсарту, дәлірек айтқанда, кенді бастапқы ұсақтау процесін тұрақтандыру мақсатында бұрғылау-жару жұмыстарын оңтайландыру шараларын өткізу тәжірибесі баяндалған. Мақалада бұрғылау-жару жұмыстарының ұтымды параметрлерін есептеу әдістері және нәтижелері келтірілген. Бұдан басқа, ұтымды параметрлерге және эксперименттік жарылыстар үшін ұсынылған параметрлерге сәйкес жарылған жыныстардың гранулометриялық құрамын есептеу жүргізілді.

**Түйінді сөздер:** *негізгі жарылыс нәтижелері, бұрғылау-жару жұмыстары, ұтымды параметрлер, бастапқы ұсақтау, гранулометриялық құрам, торды тарылату.*

### Rational parameters of drilling and blasting works providing the least costs of ore mining and processing

**Abstract.** One of the main tasks of preparatory work in mineral extraction is the delivery of the required quality and quantity of broken rock mass to the processing plant. The primary method of regulating this process is optimizing the parameters and technologies of drilling and blasting operations. At the Aktogay deposit, a problem has arisen with the increasing hardness of the mined ore as the pit deepens, significantly affecting the performance of the processing plant. The article presents the experience of implementing measures to optimize drilling and blasting operations to improve the performance of the processing plant, specifically to stabilize the primary ore crushing process. The article provides methods for calculating rational parameters and results of drilling and blasting operations. Calculations were made for the rational parameters of drilling and blasting operations, as well as for the granulometric composition of blasted rock under rational parameters and those proposed for experimental blasts.

**Key words:** *key blast results, drilling and blasting operations, optimal parameters, primary crushing, granulometric composition, grid tightening.*

### Введение

Открытые горные работы представляют собой комплекс работ и мероприятий, нацеленных на извлечение полезных ископаемых (ПИ) из недр Земли. Одним из ключевых этапов ведения горных работ являются буровзрывные работы, которые напрямую влияют на дальнейшие этапы добычи и переработки ПИ. Казахстан является одним из крупнейших поставщиков ПИ на мировом рынке. Рационализация буровзрывных работ и согласование их с последующими процессами переработки ПИ остается важной и актуальной проблемой казахстанских недропользователей. Одним из предприятий, где остро стоит данная проблема, является KAZ Minerals с их проектом Актогай.

Актогайское месторождение находится в восточном регионе Казахстана, в Аягоском районе Семипалатинской области. Оно расположено в 100 км к юго-западу от районного центра Аягос, 420 км от районного центра Усть-Каменогорск и 1250 км от Астаны, столицы Казахстана.

На нем возникла задача по оптимизации БВР для дальнейшего улучшения дробления, увеличения производительности дробилок и снижения затрат на обогащающей фабрике. Проблема с измельчением и увеличением энергозатрат на обогащающей фабрике возникла из-за изменения состава поступающей руды. С увеличением глубины карьера стали преобладать диориты, которые имеют повышенную прочность по сравнению с ранее до-

бываемыми породами. Это привело к нестабильной работе обогащающей фабрики, а в следствии к простою и убыткам. Для решения проблемы было предложено сужение сетки скважин для уменьшения фракции, поступающей на ОФ, руды.

На данный момент в большинстве горных предприятий параметры БВР устанавливаются эмпирическим путем без учета механизма разрушения горных пород, физико-механических свойств пород и физико-химических характеристик ВВ.

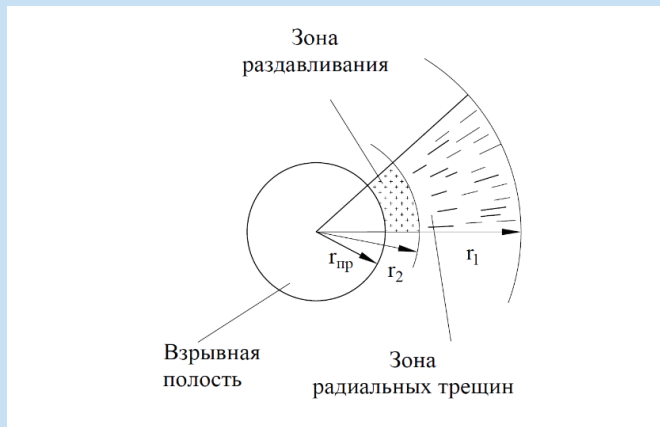
Так применяется несколько подходов по определению параметров БВР, в которых в качестве ключевых факторов, определяющих расположение скважин в массиве горных пород, принимается удельный расход ВВ и крепость горных пород. В силу наличия множества эмпирических, неопределенных коэффициентов рассмотренные методики не всегда дают удовлетворительные результаты, что отрицательно сказывается на эффективности ведения взрывных работ.

Из методик, основанных на расчете размеров зон разрушения породного массива [1-3], можно привести работу В.Н. Мосинца и Н.П. Горбачевой [1]. В ней, как и в работах [2, 3], формулы являются эмпирическими. В них не находят отражение физико-механические свойства пород, характеристики применяемого ВВ. В целях устранения этих недостатков предложен новый метод, основанный на использовании ключевых результатов взрыва в отбиваемом слое пород.

*Ключевые результаты взрыва зарядов ВВ в отбиваемом слое пород*

Разрушение горных пород действием взрыва заряда ВВ зависит от конкретного сочетания многочисленных влияющих факторов. В общем случае оно протекает в соответствии с гипотезой Г.И. Покровского [4], получившей дальнейшее развитие в работах Б.Р. Ракишева [5, 6].

К ключевым результатам разрушения горных пород взрывом заряда ВВ относятся предельный радиус взрывной полости, прочность пород в условиях всестороннего взрывного нагружения, радиус зоны мелкого дробления, радиус зоны радиальных трещин и принцип рационального размещения зарядов в отбиваемом слое пород (рис. 1).



$r_{пр}$  – предельный радиус взрывной полости,  
 $r_2$  – радиус зоны мелкого дробления,  $r_1$  – радиус зоны трещинообразования

**Рис. 1. Структура зон разрушения вокруг взрывной полости.**

**Сурет 1. Жарылыс куыс айналасындағы қирау аймақтарының құрылымы.**

**Figure 1. The structure of the destruction zones around the explosive cavity.**

С использованием общих теорем теоретической механики, закономерностей и положений теории упругости [7] в работах [5, 6] для относительного предельного радиуса взрывной полости – основного критерия эффекта взрыва в твердой среде Б. Ракишевым получено уравнение:

$$\bar{r}_{пр} = (P_n/P_c)^{1/4}, \quad (1)$$

где  $P_n$  – начальное давление продуктов взрыва (ПВ) в зарядной камере,  $P_n = \frac{1}{8} \rho_{ВВ} D^2$ , МПа;  $P_c$  – прочностная характеристика пород в условиях всестороннего взрывного нагружения.

$P_c = \sigma_{сж} \left( \frac{\rho_0 c^2}{\sigma_{сж}} \right)^{1/4}$ , ПМа,  $\rho_{ВВ}$  – плотность заряда ВВ в шпуре (скважине), кг/м<sup>3</sup>;  $D$  – скорость детонации заряда ВВ в шпуре, м/с.

$\sigma_{сж}$  – предел прочности породы на сжатие, МПа;  $\rho_0$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость звука в породе, м/с.

Радиус зоны мелкого дробления (см. рис. 1) равен [6]:

$$r_2 = r_{пр} \left( \frac{\rho_0 c^2}{5\sigma_{сж}} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $r_{пр}$  – предельный радиус взрывной полости, м:  $r_{пр} = \bar{r}_{пр} \cdot r_0$ ;  $r_0$  – радиус шпура, м.

Для радиуса зоны радиальных трещин имеем [6]:

$$r_1 = r_2 \frac{\nu}{1+\nu} \cdot \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}, \quad (3)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\sigma_p$  – предел прочности породы на растяжение, МПа.

Принцип рационального размещения зарядов ВВ во взрываеом массиве, предусматривающий наибольший охват отбиваемого слоя пород трещинами, образованными действием взрыва при уступной отбойке выражен равенствами [5, 6]:

$$(1+k)^{1/2} \frac{\pi r_1}{2W} \approx 1, \quad \frac{2r_1}{a} \approx 1, \quad (1+k)^{1/2} \frac{h_3+r_2}{h} \approx 1, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий доли разрушения массива пород как от действия отраженных волн, так и вспучивающего действия взрыва и  $k=1$ ;  $W$  – линия сопротивления по подошве уступа (ЛСПП), м;  $a$  – расстояние между скважинами в ряду, м;  $h_3$  – высота цилиндрического заряда в скважине без перебура, м;  $h$  – высота взрываеомого блока, м.

*Аналитическое определение рациональных параметров расположения зарядов массиве пород*

Исходные данные для проектирования параметров массового взрыва: размеры взрываеомого блока массива пород (длина ( $L$ ), ширина ( $B$ ), высота ( $h$ )), структурные характеристики (трещиноватость, гранулометрический состав естественных отдельных в массиве  $[p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)]$ , средний диаметр естественных отдельных  $d_e$ ), упругие (плотность  $\rho$ , скорость звука  $c$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ ) и прочностные свойства пород (предел прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$ , предел прочности на растяжение  $\sigma_p$ ), характеристики применяемого типа ВВ (плотность  $\rho_{ВВ}$ , скорость детонации  $D$ , начальное давление продуктов детонации (ПД)  $P_n$ ).

Необходимо установить параметры пространственного размещения зарядов ВВ во взрываеомом блоке: диаметр скважины  $d_s$ , линию сопротивления по подошве уступа  $W$ , расстояние между скважинами  $a$ , расстояние между рядами скважин  $a_p$ , длину заряда  $l_1$  в скважине, длину заряда  $h_3$  над уровнем подошвы уступа, длину незаряженной части скважины  $l_2$ , длину перебура  $l_n$ .

Линия сопротивления по подошве уступа (ЛСПП) является важнейшим параметром расположения зарядов в массиве уступа.

Ее можно представить в виде:

$$W = \left( \frac{h}{8} \right)^{1/3} \frac{\pi r_1}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

Рациональные параметры БВР определяются по следующим формулам:

$$a = \left(\frac{h}{8}\right)^{1/4} 2r_1, h_3 = 0,7h - r_2, l_2 = 0,3h + r_2,$$

$$l_n = \kappa_n r_1 / 3, l_1 = h_3 + l_n = 0,7h,$$

$$q_p = \frac{mq}{(w+(m-1) \cdot a_p) \cdot a \cdot h} \quad (6)$$

По данным предприятия известно о свойствах породы на экспериментальных участках, это разновидность диоритов с плотностью 2720-2920 кг/м<sup>3</sup>, скорость звука в породе 5300-5500 м/с, предел прочности на сжатие 98 МПа, предел прочности на растяжение ~ 9 МПа, коэффициент Пуассона 0,2, применяемое ВВ Fortis Extra с характеристиками 1100-1300 кг/м<sup>3</sup>, скорость детонации от 4000 до 6200 м/с. Расчет рациональных, типовых и новых параметров БВР приведен в таблице 1.

*Аналитическое определение гранулометрического состава взорванной горной массы*

Важнейшей характеристикой взорванной горной массы является ее кусковатость. При уступной отработке массивов горных пород она зависит от физико-механических

свойств пород, блочности (трещиноватости) массивов, химико-физических характеристик применяемого взрывчатого вещества (ВВ), высоты уступа, диаметра заряда ВВ, параметров расположения зарядов ВВ во взрывае-мом блоке уступа, конструкции заряда в скважине, схем взрывания зарядов, обводненности скважин. Результаты совместного влияния этих факторов на формирование гранулометрического состава взорванной горной массы – критерия кусковатости могут быть выявлены на основе закономерностей разрушения массива крепких горных пород действием взрыва.

Кусковатость и распределение кусков по размерам в отбитой горной массе наиболее полно могут быть представлены размерами зон дробления и процентным содержанием различных фракций в развале. Они могут быть определены теоретически. При этом процесс формирования кусков пород по размерам в различных слоях взорванных пород начинается как видно на рис. 2 с зоны раздавливания (мелкого дробления). К этой зоне последовательно примыкают породы из зоны радиальных трещин, зоны трещин, развиваемых от свободной поверхности, и зоны совместного разрушения действием продуктов детонации.

Таблица 1

*Результаты автоматизированного расчета параметров БВР для экспериментальных взрывов*

Кесте 1

*Тәжірибелік жарылыстардың жарылыс параметрлерін автоматтандырылған есептеу нәтижелері.*

Table 1

*Results of automated calculation of blasting parameters for experimental explosions*

Параметры БВР	1	2	3
Прочностная характеристика породы, МПа	502,98		
Начальное давление ПВ, МПа	2200		
Относительный предельный радиус полости	1,45		
Радиус скважины, м	0,1015	0,1015	0,1015
Предельный радиус полости, м	0,15		
Радиус зоны мелкого дробления, м	1,73		
Радиус зоны радиальных трещин, м	3,14		
Число рядов скважин, шт.	4	4	4
ЛСПП, м	7,5	6,8	6
Расстояние между скважинами, м	6,64	5,8	5,2
Расстояние между рядами скважин, м	6,64	6,8	6
Длина перебура, м	1,31	1	1
Глубина скважины, м	11,31	11	11
Длина заряда в скважине, м	6,06	6	6,8
Длина недозаряда скважины, м	5,25	5	4,2
Вместимость 1-го погонного метра, кг	35,6	35,6	35,6
Масса заряда, кг	215,72	213,6	242,08
Всего ВВ на цикл, кг	862,88	854,4	968,32
Fortis Extra			
Объем бурения, м	45,24	44	44
Объем отбойки, м <sup>3</sup>	1820,7	1577,6	1248
Выход горной массы с одного метра скважины м <sup>3</sup> /м	40,24	35,85	28,36
Удельный расход ВВ, кг/м <sup>3</sup>	0,474	0,542	0,77

Примечание: расчетные (1), типовые (2) и принятые (3) параметры БВР

Процентное содержание различных по крупности кусков предопределяется влиянием различных действующих факторов.

Для решения поставленной задачи объем пород в указанных зонах в соответствии с рис. 1, 2 необходимо разбить на отдельные части по крупности кусков, содержащихся в нем. Основой для этого служат экспериментальные данные, полученные при взрыве метрового уступа, сложенного из пестроцветных глин [5]. В результате анализа этих данных установлено, что линейный размер кусков вблизи контура зоны интенсивного дробления в своем большинстве составляет  $(1,4-1,6)r_0$  в соответствии с рис. 1 [8, 9].

Расчеты показывают, что при применении скважин диаметром  $d_0 = 0,2$  м весь объем зоны мелкого дробления состоит из кусков размером до 0,15 м, а зона радиальных трещин содержит куски размером 0,17÷0,50 м. Действительно, как показывают замеры, при рациональном размещении зарядов в массиве наиболее распространенный размер кусков в области между взорванными скважинами обычно не превышает 0,60 м.

Исходя из того, что максимальный линейный размер кусков пород в развале редко превышает 1,4 м, их с шагом 0,2 м обычно подразделяют на 7 классов. К первому классу относят куски размером до 0,2 м, ко второму классу – размером 0,21–0,40 м, к третьему – размером 0,41–0,60 м и т. д. до седьмого класса, к которому относят куски размером более 1,21 м. Куски пород первых трех классов формируются в зонах мелкого дробления и радиальных трещин. Объединенную зону можно назвать зоной интенсивного дробления пород в соответствии с рис. 2б. Последующие классы пород образуются в оставшейся части взорванного блока уступа за вычетом из нее объема зоны интенсивного дробления. Эту зону называют зоной пассивного дробления. В ней происходит взрывное расчленение массива пород на естественные отдельные с незначительным их дроблением. Такая интерпретация формирования базы гранулометрического состава взорванных пород полностью соответствует современным представлениям о разрушении массива пород взрывом [10, 11].

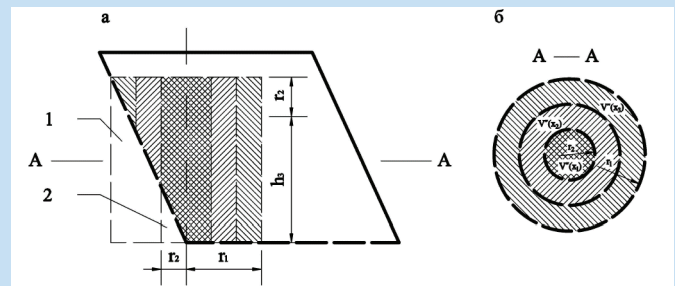
В соответствии с моделью поэтапного разрушения массива объем интенсивно раздробленной породы в первой стадии взрыва обуславливается размером зоны радиальных трещин. Следовательно, объем интенсивно разрушенной породы одним скважинным зарядом равняется объему цилиндра с радиусом  $r_1$  и высотой  $h_3 + r_2$  в соответствии с рис. 1. К этому объему присоединяется разрушенная порода за счет отраженной волны и газообразных продуктов взрыва, и весь объем разрушенной породы одним скважинным зарядом составляет

$$V_{др} = (1 + k_1 + k_2)\pi r_1^2 (h_3 + r_2), \quad (7)$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты, учитывающие долю разрушенного объема за счет отраженной волны растяжения и за счет вспучивающего действия взрыва соответственно. На основе данных их сумму ( $k_1 + k_2 = k$ ) можно принять равной 1, т. е.  $k = 1$ .

Данные экспериментальных взрывов [12] показали, что объем интенсивного дробления вокруг заряда  $V'_{др}$  состоит из кусков пород первых трех классов в соответствии с рис. 2. При этом к первому классу (0-0,2 м) может быть отнесен весь объем породы зоны мелкого дробления и одна треть объема породы из зоны радиальных трещин (с учетом равной вероятности присутствия этих фракций в рассматриваемой зоне), а ко второму (0,2-0,4 м) и третьему (0,4-0,6 м) классам – соответственно по одной трети упомянутого объема. В случае скважин, расположенных в последнем ряду блока, из первого класса крупности исключаются неразрушенный объем пород из зоны мелкого дробления в соответствии с рис. 2а, отрезок цилиндра 1, объем неразрушенного слоя отрезка цилиндра за зоной мелкого дробления в соответствии с рис. 2а, слой 2, из второго и третьего классов крупности соответственно исключаются неразрушенные слои отрезков цилиндра в зоне радиальных трещин по одной трети в каждом классе крупности в соответствии с рис. 2а, слои 3, 4.

Такое распределение интенсивно раздробленных кусков пород по классам крупности вокруг зарядов в последнем ряду показано на рис. 2а.



в поперечном разрезе уступа (а), по разрезу А–А (б)

**Рис. 2. Расположение классов пород по крупности  $V'''(x_3), V'''(x_2), V'''(x_1)$  в зоне интенсивного дробления в последнем ряду скважин.**

**Сурет 2. Соңғы ұңғыма қатарындағы интенсивті ұсақтау аймағында жыныс кластарын  $V'''(x_3), V'''(x_2), V'''(x_1)$  ірілігі бойынша орналастыру.**

**Figure 2. Arrangement of Rock Size Classes  $V'''(x_3), V'''(x_2), V'''(x_1)$  in the Intense Fragmentation Zone in the Last Row of Boreholes.**

Таким образом, при многорядном расположении скважин:

$$V'''(x_1) = n \left( \pi r_2^2 (h_3 + r_2) + \frac{1}{3} \pi (r_1^2 - r_2^2) (h_3 + r_2) \right) - n_T \left( \frac{2}{3} r_2^3 t g \alpha + \frac{2}{9} (r_1^3 - r_2^3) t g \alpha \right),$$

$$V'''(x_2) = V'''(x_3) = n \left( \frac{1}{3} \pi (r_1^2 - r_2^2) (h_3 + r_2) \right) - n_T \frac{2}{9} (r_1^3 - r_2^3) t g \alpha, \quad (8)$$

где  $V'''(x_1), V'''(x_2), V'''(x_3)$  – объемы пород соответственно первого  $x_1$ , второго  $x_2$  и третьего  $x_3$  классов крупности

в зоне интенсивного дробления массива;  $n$  – общее количество скважин;  $n_T$  – количество скважин в последнем ряду;  $\alpha$  – угол откоса уступа;  $h_3 + r_2$  – высота цилиндра – интенсивно разрушенного объема породы в соответствии с рис. 2.

Объем породы, пронизанный радиальными трещинами в тыльной части массива, представляет собой отрезок цилиндра и рассчитывается по:  $V_{o.ц} = 2/3r_1^3tg\alpha$ . В зоне мелкого дробления  $V_{o.ц} = 2/3r_2^3tg\alpha$ . Объем слоя отрезка цилиндра за зоной мелкого дробления  $V_{o.ц}^c = 2/3(r_1^3 - r_2^3)tg\alpha$ . Весь объем интенсивно раздробленной породы в рассматриваемой зоне равняется сумме объемов пород первых трех классов крупности:

$$\begin{aligned} V_{ц} &= V''(x_1) + V''(x_2) + V''(x_3) = \\ &= n\pi r_1^2(h_3 + r_2) - n_T \frac{2}{3} r_1^3 tg\alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение (9) подтверждает справедливость соотношений (8).

Во всей взорванной горной массе к перечисленным классам крупности пород необходимо прибавлять соответствующие естественные отдельности, входящие в состав остальной части взрывающегося блока. Эти объемы пропорциональны их содержанию в массиве пород (таблица 2).

Таким образом, объемы первых трех классов во всей взорванной породе определяются по формулам:

$$\begin{aligned} V'(x_1) &= (1+k)[V''(x_1) + p(x_1)V''(x_2) + \\ &+ p(x_1)V''(x_3)] + p(x_1)[V - (1+k)V_{ц}] \\ V'(x_2) &= (1+k)[V''(x_2) + p(x_2)V''(x_3) + \\ &+ p(x_1)V''(x_2)] + p(x_2)[V - (1+k)V_{ц}] \\ V'(x_3) &= (1+k)[V''(x_3) + p(x_1)V''(x_3) + \\ &+ p(x_2)V''(x_3)] + p(x_3)[V - (1+k)V_{ц}] \end{aligned} \quad (10)$$

здесь  $V$  – объем породы взрывающегося блока массива;  $V''(x_i)$  – объем интенсивно раздробленной породы  $i$ -го класса ( $i \leq 3$ );  $V'(x_i)$  – весь объем породы  $i$ -го класса после взрыва;  $p(x_i)$  – содержание кусков  $i$ -го класса в массиве, дол. ед.

$$V = LBh = an_c(W + a_p(n_p - 1))h.$$

Здесь  $n_c$  – количество скважин в ряду;  $n_p$  – количество рядов скважин.

Как видно из (10), объем пород первого класса крупности во всей взорванной породе состоит из объемов пород, содержащихся в первом, втором и третьем классах в зоне интенсивно дробления и объема таких классов в остальной части взорванной породы. Этот объем пород пропорционален разности объемов взрывающегося блока и интенсивно раздробленных пород. Коэффициент пропорциональности равен процентному долевому содержанию рассматриваемого куска в массиве. Объем пород второго

класса крупности состоит из суммы объемов второго и третьего классов в зоне интенсивного дробления за вычетом объема пород первого класса и с прибавлением к ним части второго класса в остальной части взорванной породы. Объем пород третьего класса рассчитывается по аналогичной схеме.

Классы пород по крупности более 0.61 м формируются в зоне пассивного дробления под совокупным действием волновых процессов и газообразных продуктов взрыва. При этом происходит расчленение взрывающегося блока на естественные отдельности (в первой стадии взрыва) с незначительным их дроблением. Последнее реализуется за счет соударения кусков пород при перемещении во второй и третьей стадиях взрыва.

Для определения объема сокращения крупных кусков в общей массе примем следующие предположения. Куски пород размером более 1.21 м в результате соударения в общем объеме сократятся на одну четвертую (1/4) своего первоначального значения. Раздробленная часть этих кусков распределяется по нижнему классу (1.01-1.20 м), т. е. к нему прибавляется 1/4 часть содержания самых крупных кусков. Процентное содержание кусков в шестом классе (1.01-1.20 м) также уменьшится на 1/4 своего первоначального значения. Его раздробленная часть прибавляется к нижнему классу (0.81-1.00 м). Иначе говоря, доля этого класса увеличится еще на 1/4 содержания предыдущего класса. Доля кусков в пятом классе (0.81-1.00) уменьшится на одну четвертую первоначального значения. Эта доля прибавится к четвертому классу крупности (0.61-0.80). Структура кусков пород размером до 0.6 м не претерпевает изменений. В целом описанное перераспределение кусков пород во второй и третьей стадиях взрыва можно записать в виде:

$$\begin{aligned} q(x_1) &= p(x_1), \quad q(x_2) = p(x_2), \quad q(x_3) = p(x_3), \\ q(x_4) &= p(x_4) + \frac{1}{4}p(x_5), \\ q(x_5) &= \frac{3}{4}p(x_5) + \frac{1}{4}p(x_6). \\ q(x_6) &= \frac{3}{4}p(x_6) + \frac{1}{4}p(x_7), \quad q(x_7) = \frac{3}{4}p(x_7). \end{aligned} \quad (11)$$

Эти зависимости представляют собой виртуальное содержание естественных отдельностей в массиве пород. Их численные значения приведены в таблице (вторая строка). Процентное содержание естественных отдельностей является численной характеристикой структуры массива пород.

По среднему диаметру естественных отдельностей массивы пород карьеров Актогайского месторождения, как и других месторождений, подразделены на мелкоблочные (чрезвычайно трещиноватые), среднеблочные (силнотрещиноватые), крупноблочные (среднетрещиноватые) и весьма крупноблочные (малотрещиноватые). Блочность массива оказывает сильное влияние на образование раздробленных кусков во всех стадиях взрыва.

По аналогии со вторым слагаемым выражений (10) объемы пород крупных классов (выше 0.61 м) в зоне пассив-

Таблица 2

Реальный (числитель) и виртуальный (знаменатель) гранулометрический состав естественных отдельностей в массивах пород

Кесте 2

Шын мәніндегі (жоғарғы) және виртуалды (төменгі) табиғи бөлшектердің жыныс массивтеріндегі гранулометриялық құрамы

Table 2

Real (numerator) and Virtual (denominator) Granulometric Composition of Natural Particles in Rock Masses

Наименование пород	Массивы по блочности (степень трещиноватости)	Содержание в массиве (%) естественных отдельностей размером (м)							Средний диаметр, м
		<0,20	0,21–0,40	0,41–0,60	0,61–0,80	0,81–1,00	1,01–1,20	>1,2	
Альбитофир, андезитовые порфириды	Мелкоблочные (чрезвычайно трещиноватые)	<u>67,84</u>	<u>21,83</u>	<u>7,03</u>	<u>2,26</u>	<u>0,73</u>	<u>0,23</u>	<u>0,08</u>	0,19
		67,84	21,83	7,03	2,44	0,6	0,19	0,06	0,19
Мартиты, туфы диорит-порфиридов	Среднеблочные (сильнотрещиноватые)	<u>48,83</u>	<u>25,22</u>	<u>13,02</u>	<u>6,73</u>	<u>3,47</u>	<u>1,79</u>	<u>0,93</u>	0,30
		48,83	25,22	13,02	7,59	3,05	1,57	0,69	0,29
Богатые и бедные магнетитовые руды, диабазовые порфиридовые	Крупноблочные (среднетрещиноватые)	<u>30,59</u>	<u>22,23</u>	<u>16,16</u>	<u>11,75</u>	<u>8,54</u>	<u>6,21</u>	<u>4,51</u>	0,46
		30,59	22,23	16,16	13,88	7,95	5,78	3,38	0,45
Роговики, массивный известняк	Весьма крупноблочные (малотрещиноватые)	<u>19,92</u>	<u>17,66</u>	<u>15,66</u>	<u>13,88</u>	<u>12,31</u>	<u>10,91</u>	<u>9,67</u>	0,60
		19,92	17,66	15,66	16,95	11,96	10,6	7,25	0,59

ного дробления прямо пропорциональны разности объемов взрываемого блока и интенсивно раздробленных пород в нем. В качестве коэффициента пропорциональности в этом случае принимается виртуальное содержание естественных отдельностей в массиве пород. Тогда объемы пород искоемых классов ( $j \geq 4$ ) определяются по формуле:

$$V'(x_j) = q(x_j)[V - (1 + k)V_{ц}], \quad (12)$$

где  $q(x_j)$  – виртуальное содержание  $j$ -го класса в массиве пород, дол. ед.

Объемы пород различных классов крупности  $V'(x_i)$ ,  $V'(x_j)$ , формируемые соответственно в зонах интенсивного и пассивного дробления, являются базой гранулометрического состава взорванных горных пород. Для вычисления этой характеристики достаточно разделить полученные объемы (19) и (21) на объем взрываемого блока.

Содержание кусков пород первых трех классов устанавливается соотношением ( $i \leq 3$ ):

$$p'(x_i) = \frac{V'(x_i)}{V}, \quad (13)$$

а содержание кусков пород последующих классов ( $i \geq 4$ ) определяется по выражению

$$p'(x_j) = \frac{q(x_j)}{V} [V - (1 + k)V_{ц}], \quad (14)$$

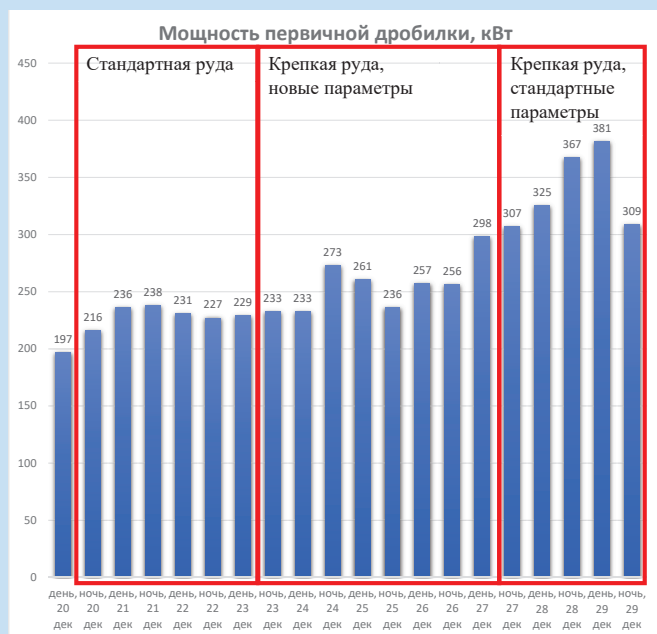
Совокупность значений  $p'(x_1)$ ,  $p'(x_2)$ , ...,  $p'(x_n)$  представляет собой гранулометрический состав взорванных горных пород.

Таким образом, по (13), (14) при заданных физико-механических, структурных свойствах пород, детонационных, энергетических характеристиках ВВ, параметрах и способе взрывания легко вычисляется гранулометрический состав взорванной руды и породы. Такой метод определения кусковатости взорванных горных пород принципиально отличается от известных эмпирических [1-3] теоретической обоснованностью и полнотой учета всех влияющих факторов на конечные результаты взрыва.

Как видно из выражений (13), (14) гранулометрический состав взорванных горных пород сильно зависит от содержания естественных отдельностей в массиве пород. Поэтому установление категории блочности массивов пород или категорий взрываемости пород на карьерах является исключительно важной задачей.

Разработана компьютерная программа для расчета параметров и результатов БВР на языке C# в среде разработки Microsoft Visual Studio 2022.

Расчетный грансостав взорванных диоритов при рациональных параметрах следующий: содержание фракций 1 класса (0-0,2 м) составляет 61,88%, 2 класса (0,2-0,4 м) 21,23%, 3 класса (0,4-0,6 м) 11,72%, 4 класса (0,6-0,8 м) 2,31%, 5 класса (0,8-1,0 м) 1,33%, 6 класса (1,0-1,2 м) 0,96%, 7 класса (>1,2 м) 0,56%. Расчетный грансостав взорванных диоритов по новым экспериментальным параметрам следующий: содержание фракций 1 класса (0-0,2 м) составляет 88,83%, 2 класса (0,2-0,4 м) 11,17%, остальные классы не присутствуют (таблица 3). По условиям предприятия негабаритов выше 1000 мм не должно превышать 3%. Как можно видеть из расчета рационального подхода



**Рис. 3. Мощность первичной дробилки на обогатительной фабрике АК1.**

**Сурет 3. АК1 байыту фабрикасындағы бастапқы ұсақтағыштың қуаты.**

**Figure 3. Power of the Primary Crusher at the AK1 Processing Plant.**

(1 строка, таблица 3) и суженной сетки скважин (3 строка, таблица 3), по новым параметрам гранулометрический состав изменяется в сторону уменьшения среднего куска в 2 раза, с 0,23 м до 0,12 м.

На рис. 3 показан график мощности первичной дробилки на обогатительной фабрике АК1 во время подачи стандартной руды, крепкой руды, взорванной по новым параметрам БВР и крепкой руды, взорванной по стандартным параметрам БВР согласно отчету инженерных служб

Актогайского месторождения и обогатительной фабрики по экспериментальным взрывам.

По экспериментальным блокам было выявлено снижение энергозатрат на стадии первичного дробления на обогатительной фабрике на 25%, средняя мощность работы первичной дробилки при типовых параметрах вышла 337,8 кВт, а при суженной сетке 255 кВт. Как видно из расчетных параметров и фактического результата имеет место увеличение расходов на БВР, т.е. объема бурения на 23%, времени работы буростанков на 20%, расход БВ на 26%, износ инструментов на 24%. Однако производительность ОФ также выросла за счет поступления более стабильной породы с уменьшенной фракцией кусков.

Необходимо дальнейшее проведение экспериментальных взрывов с другими параметрами для выявления оптимального сочетания расходов на БВР, и производительности ОФ. Предложенные методы расчетов параметров и результатов БВР полностью согласуются с экспериментальными результатами и могут быть применены для дальнейшего расчета параметров БВР, которые дадут необходимые результаты взрыва, т.е. оптимальный гранулометрический состав (средний кусок), требуемый для обогатительной фабрики.

#### Заключение

На основе ключевых результатов взрыва предложен аналитический метод определения рациональных параметров буровзрывных работ.

С учетом поэтапной модели разрушения пород и ключевых результатов взрыва был создан аналитический метод определения гранулометрического состава взорванной горной массы в зависимости от условий ведения и параметров БВР.

На основе проведенных экспериментальных взрывов на предприятиях было выявлено, что сужение сетки скважин с 5.8x6.8 м до 5.2x6 м влечет двукратное уменьшение среднего куска взорванной горной массы.

**Таблица 3**

**Расчетный гранулометрический состав взорванных пород (%) размером (м) на экспериментальных участках, диорит, крупноблочный**

**Кесте 3**

**Эксперименттік учаскелердегі жарылған жыныстардың есептелген гранулометриялық құрамы (%) өлшемі (м), диорит, ірі блоқты.**

**Table 3**

**Calculated granulometric composition of blasted rock (%) by size (m) at experimental sites, diorite, large-block**

Тип расчета	Гранулометрический состав взорванных пород (%) размером (м)							Всего, %
	<20	21-40	41-60	61-80	81-100	100-120	>120	
Автоматизированный расчет грансостава по рациональным параметрам	61,88	21,23	11,72	2,31	1,33	0,96	0,56	100
Автоматизированный расчет грансостава по прежним (типовым) параметрам	69,16	19,29	10,15	0,63	0,36	0,26	0,15	100
Автоматизированный расчет грансостава по новым параметрам	88,83	11,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100

В результате на ОФ произошло снижение энергозатрат на 25%. Несмотря на увеличение расходов на БВР (объема бурения на 23%, времени работы буростанков на 20%, расходов ВВ на 26%, износа инструментов на 24%), за счет уменьшения потребления электричества и стабилизации рудопотока для дальнейшей переработки, может быть достигнута многократная экономия.

#### Благодарность

Статья подготовлена в рамках программно-целевого финансирования министерства науки и высшего образования Республики Казахстан 2023/BR21881939 «Разработка ресурсосберегающих энергогенерирующих технологий для горно-металлургического комплекса и создание инновационного инженерингового центра».

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Mosinets V.N. Сейсмологический метод определения параметров зон деформации горных пород взрывными работами. / Mosinets V.N., Gorbacheva N.P. // Советское горное дело. 1972. Вып. 8. Ч. 6. С. 640-647 (на английском языке)
2. Каталан Алекс. Моделирование предварительной подготовки взрывом при блочном и панельном обрушении. / Каталан Алекс, Онедерра Итало. // Технология горного дела: Труды Институты горного дела и металлургии. 2016. Разд. А 126 (2). С. 59-76 (на английском языке)
3. Wang Z. Оптимизация параметров сети взрывных скважин перед расколом и их инженерное применение в открытых карьерах. / Wang Z., Wu G., Zhou L. // Прикладные науки. 2022. №12(10). Ст. №4930 (на английском языке)
4. Покровский Г.И., Федоров И.С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах: М., 1957, С. 276 (на русском языке)
5. Ракишев Б.Р. Прогнозирование технологических параметров взорванных пород на карьерах: Алма-Ата, Наука, 1983, С. 240 (на русском языке)
6. Ракишев Б.Р. Автоматизированное проектирование и производства массовых взрывов на карьерах: Алма-Ата, Наука, 2016, С. 340 (на русском языке)
7. Физика взрыва. Под ред. К.П. Станюковича: М., 1975, С. 704 (на русском языке)
8. Ракишев Б.Р., Ауэзова А.М., Ракишева З.Б. Уточнение гранулометрического состава естественных трещин в массиве горных пород по их среднему размеру. // Материалы 9-й Международной конференции по физическим проблемам разрушения горных пород, Пекин, Китай, 2014. – С.274-282 (на английском языке)
9. Rakishev B. Цифровая иерархическая модель комковатости взорванного горного массива. / Rakishev B., Rakisheva Z.B., Auezova A.M., Orynbay A.A. // Горные технологии. 2020. №129 (4). С. 228-237 (на английском языке)
10. Викторов С.Д. Теоретические и экспериментальные исследования характера распределения энергии в массиве горных пород при взрыве технологических зарядов. / С.Д. Викторов, Ю.П. Галченко. // Инженерная физика. 2018. №7. С. 43-50 (на русском языке)
11. Ракишев Б.Р. Формирование гранулометрического состава взорванных пород при уступной отбойке. // ФТПРПИ. 2020. №1. С. 41-53 (на русском языке)
12. Ракишев Б.Р. Распределение естественных отделенностей по размерам в массиве горных пород. / Б.Р. Ракишев, А.М. Ауэзова, А.П. Калиева, А.Н. Дауренбекова. // Взрывное дело. 2014. №111/68. С.18-30 (на русском языке)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Mosinets V.N. Жару арқылы тау жыныстарының деформациялану аймақтарының параметрлерін анықтаудың сейсмологиялық әдісі. / Mosinets V.N., Gorbacheva N.P. // Кеңестік тау-кен ғылымы. 1972. Шығ.8. Ч. 6. Б. 640-647 (ағылшын тілінде)
2. Каталан Алекс. Блок пен панельді құлату кезінде жарылыс арқылы алдын ала дайындауды модельдеу. / Каталан Алекс, Онедерра Итало. // Тау-кен өндіру технологиясы: Тау-кен металлургия институттарының еңбектері. 2016. Сек. А 126 (2). Б. 59-76 (ағылшын тілінде)
3. Wang Z. Жару алдындағы жару саңылауларының желілік параметрлерін және ашық кеніштегі инженерлік қолданбаларды оңтайландыру. / Wang Z., Wu G., Zhou L. // Қолданбалы ғылымдар. 2022. №12 (10). Мақ. №4930 (ағылшын тілінде)
4. Покровский Г.И., Федоров И.С. Деформацияланатын ортадағы соққы мен жарылыстың әрекеті: М., 1957, Б. 276 (орыс тілінде)
5. Ракишев Б.Р. Карьерлерде жарылған жыныстардың технологиялық параметрлерін болжау: Алматы, Ғылым, 1983, Б. 240 (орыс тілінде)
6. Ракишев Б.Р. Карьерлерде жаппай жарылыстарды автоматтандырылған жобалау және өндіру: Алматы, Ғылым, 2016. Б. 340 (орыс тілінде)
7. Жарылыс физикасы, Станюкович К.П. ред.: М., 1975, Б. 704 (орыс тілінде)
8. Рақышев Б.Р., Әуезова А.М., Рақышева З.Б. Тау жыныстары массаларындағы табиғи жарықшақтардың гранулометриялық құрамын олардың орташа өлшемдері бойынша нақтылау. // Тау жыныстарының сынуының физикалық мәселелері бойынша 9-шы халықаралық конференция материалдары, Пекин, Қытай, 2014. – Б. 274-282 (ағылшын тілінде)
9. Rakishev B. Жарылған тау массасының кесектігінің цифрлық иерархиялық моделі. / Rakishev B., Rakisheva Z.B., Auezova A.M., Orynbay A.A. // Тау-кен өндіру технологиясы. 2020. №129 (4). Б. 228-237 (ағылшын тілінде)



10. Викторов С.Д. Тау жыныстары массивінде технологиялық зарядтарды жару кезінде энергияның таралу сипатын теориялық және эксперименттік зерттеулер. / С.Д. Викторов, Ю.П. Галченко. // Инженерлік физика. 2018. №7. Б. 43-50 (орыс тілінде)
11. Ракишев Б.Р. Үстемелі соққы кезінде жарылған жыныстардың гранулометриялық құрамын қалыптастыру. // ФТПРПИ. 2020. №1. Б. 41-53 (орыс тілінде)
12. Ракишев Б.Р. Тау жыныстары массивінде табиғи жіктелулердің өлшемдері бойынша таралуы. / Б.Р. Ракишев, А.М. Әуезова, А.П. Калиева, А.Н. Дауренбекова. // Жарылыс ісі. 2014. №111/68. Б. 18-30 (орыс тілінде)

## REFERENCES

1. Mosinets V.N. A seismological method of determining the parameters of the zones of deformation of rock by blasting / Mosinets V.N., Gorbacheva N.P. // Soviet Mining Science. 1972. Vol. 8, Oss. 6. P. 640-647 (in English)
2. Catalan Alex. Modeling of preliminary preparation by explosion during block and panel collapse. / Catalan Alex, Onederra Italo. // Mining technology: Proceedings of the Institutes of Mining and Metallurgy. 2016. Sec. A 126 (2). P. 59-76 (in English)
3. Wang Z. Optimization of blast hole network parameters before fracturing and their engineering application in open pits. / Wang Z., Wu G., Zhou L. // Applied Sciences. 2022. №12 (10). Art. №4930 (in English)
4. Pokrovskii G.I., Fedorov I.S. Deistvie udara i vzryva v deformiruemyykh sredakh: M., 1957, S. 276 [Pokrovsky G. I., Fedorov I. S. Action of Impact and Explosion in Deformable Media: Moscow, 1957, P. 276] (in Russian)
5. Rakishev B.R. Prognozirovanie tekhnologicheskikh parametrov vzorvannykh porod na kar'erakh: Alma-Ata, Nauka, 1983, S. 240 [Rakishev B.R. Prediction of technological parameters of blasted rocks in quarries: Alma-Ata, Science, 1983, P. 240] (in Russian)
6. Rakishev B.R. Avtomatizirovannoe proektirovanie i proizvodstva massovykh vzryvov na kar'erakh: Alma-Ata, Nauka, 2016, S. 340 [Rakishev B.R. Automated Design and Production of Mass Blasts in Open Pits: Alma-Ata, Science, 2016. P. 40] (in Russian)
7. Fizika vzryva. Pod red. K.P. Stanyukovicha: M., 1975, S. 704 [Physics of Explosion. Stanyukovich K.P. Ed.: Moscow, 1975. P. 704] (in Russian)
8. Rakishev B.R., Auezova A.M., Rakisheva Z.B. The specification of granulometric composition of natural jointing in the rock massif by their average size. // Proceedings of the 9th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction, Beijing, China, 2014. – P. 274-282 (in English)
9. Rakishev B. Digital hierarchical model of lumpiness of blasted rock mass. / Rakishev B., Rakisheva Z.B., Auezova A.M., Orynbay A.A. // Mining Technology. 2020. №129 (4). P. 228-237 (in English)
10. Viktorov S.D. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya kharaktera raspredeleniya energii v massive gornykh porod pri vzryve tekhnologicheskikh zaryadov. / S.D. Viktorov, Yu.P. Galchenko. // Inzhenernaya fizika. 2018. №7. С. 43-5 [Viktorov S.D. Theoretical and Experimental Studies of the Energy Distribution Character in a Rock Mass during the Explosion of Technological Charges. / Viktorov S.D., Galchenko Yu.P. // Engineering Physics. 2018. №7. P. 43-50] (in Russian)
11. Rakishev B.R. Formirovanie granulometricheskogo sostava vzorvannykh porod pri ustupnoi otboike. // FTRPI. 2020. №1. С. 41-53 [Rakishev B. R. Formation of Granulometric Composition of Blasted Rocks during Bench Blasting. // FTRPI. 2020. №1. P. 41-53] (in Russian)
12. Rakishev B.R. Raspredelenie estestvennykh otdel'nostei po razmeram v massive gornykh porod. / B.R. Rakishev, A.M. Auezova, A.P. Kalieva, A.N. Daurenbekova. // Vzryvnoe delo. 2014. №111/68. S.18-30 [Rakishev B.R. Distribution of Natural Particles by Size in a Rock Mass. / Rakishev B.R., Auezova A.M., Kaliyeva A.P., Daurenbekova A.N. // Blasting Affairs. 2014. №111/68. P. 18-30] (in Russian)

## Сведения об авторах:

**Орынбай А.А.**, PhD, ВНС кафедры «Горное дело» НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), [a.orynbay@aes.kz](mailto:a.orynbay@aes.kz); <https://orcid.org/0000-0002-3720-7625>

**Алибаев А.Е.**, докторант, МНС кафедры «Горное дело», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), [azamatlibaev@mail.ru](mailto:azamatlibaev@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6747-6148>

**Ибырханов Т.С.**, докторант, МНС кафедры «Горное дело», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), [ibir.tem@mail.ru](mailto:ibir.tem@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0001-6344-8270>

## Авторлар туралы мәліметтер:

**Орынбай А.А.**, PhD, «Тау-кен ісі» кафедрасының ЖФК, КеАҚ «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» (Алматы қ., Қазақстан)

**Алибаев А.Е.**, «Тау-кен ісі» кафедрасының КФК, докторанты, КеАҚ «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» (Алматы қ., Қазақстан)

**Ибырханов Т.С.**, «Тау-кен ісі» кафедрасының КФК, докторанты, КеАҚ «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» (Алматы қ., Қазақстан)

## Information about the authors:

**Orynbay A.A.**, PhD, LR of the Mining Department of the NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev» (Almaty, Kazakhstan)

**Alibaev A.Ye.**, JR, doctoral student of the Mining Department of the NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev» (Almaty, Kazakhstan)

**Ibyrkhanov T.S.**, JR, doctoral student of the Mining Department of the NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev» (Almaty, Kazakhstan)