

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛОСТЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ В МНОГОЯРУСНОМ РУДНОМ ШТАБЕЛЕ ДЛЯ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА ПРИ КАМУФЛЕТНОМ ВЗРЫВЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СКВАЖИН

БОРОВКОВ Ю. А., ДЕРЕВЯШКИН И. В., ЯКШИБАЕВ Т. М.

В статье рассматривается применение новых рациональных методов по интенсификации процесса кучного выщелачивания золота путем встряхивания многоярусного рудного штабеля взрывом камуфлетного скважинного заряда. Аналитически исследован механизм камуфлетного взрыва взрывчатого вещества в сыпучей среде и обоснованы его основные параметры, установлены прочностная характеристика массива горных пород в многоярусном рудном штабеле для кучного выщелачивания, зависящая от сжимаемости, энергетических характеристик применяемого взрывчатого вещества и динамического предела прочности породы на сжатие (раздавливание). Эта характеристика показывает, во сколько раз увеличивается сопротивляемость пород разрушению в ближней зоне взрыва при всесторонней динамической нагрузке, она различна для разных типов горных пород и определяется их физико-механическими свойствами. При этом для разрушенных горных пород многоярусного рудного штабеля за счет шероховатости кусков и наличия сил зацепления между ними также существует прочность при одноосном сжатии и растяжении. Однако растяжение экспериментально определить очень сложно. Поэтому для построения паспорта прочности опытным путем определить величину сцепления (прочность на сдвиг). При этом следует обратить внимание на то, что угол внутреннего трения разрушенной породы всегда больше, чем идеально сыпучей.

Ключевые слова: кучное выщелачивание; многоярусный рудный штабель; интенсификация; встряхивание; камуфлетный скважинный заряд.

Совершенствование процесса кучного выщелачивания (КВ) многоярусного рудного штабеля возможно благодаря применению новых рациональных методов, одним из которых является встряхивание многоярусного рудного штабеля пород взрывом камуфлетного скважинного заряда. Данный способ приемлем в случае снижения концентрации золота в продуктивном растворе с течением времени. Необходимо произвести встряхивание многоярусного рудного штабеля горных пород взрывами камуфлетных скважинных зарядов взрывчатых веществ (ВВ), при этом происходят перемещение, измельчение, размежевание и изменение ориентации кусков породы в глубине многоярусного рудного штабеля с образованием дополнительных микро- и макротрещин. Для изучения процесса встряхивания рудного штабеля необходимо исследовать механизм камуфлетного взрыва ВВ в сыпучей среде и обосновать основные его параметры.

Рассмотрим физическую картину взрывного разрушения массива горных пород, в основу которой положено экспериментальное подтверждение и ставшая класси-

Боровков Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства. 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Российский государственный геологоразведочный университет. E-mail: bua_51@mail.ru

Деревяшкин Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техники и технологии горного и нефтегазового производства. 129626, г. Москва, ул. Павла Корчагина, 22, стр. 3, Московский политехнический университет. E-mail: gornoeдело-um@mail.ru

Якшибаев Темур Минграхматович – аспирант кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства. 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Российский государственный геологоразведочный университет. E-mail: temur19.01.1988.tm@list.ru

ческой схема взрыва в твердой среде [1]. После детонации скважинного заряда взрывчатого вещества, в момент, когда детонационная волна доходит до поверхности заряда, соприкасающегося с породой, на нее действуют ударная волна (волна сжатия) и продукты взрыва – взрывные газы с весьма высоким давлением.

В результате в среде возникает волна сжатия, которая сжимает и раздавливает слои пород на контакте *продукты взрыва–среда*. При этом горная порода испытывает состояние всестороннего сжатия. Размеры образовавшейся при этом зоны сжатия всецело зависят от давления, развиваемого в продуктах взрыва в этой зоне, прочностных и упругих свойств окружающей заряд породы [2].

При дальнейшем удалении от центра взрыва снижается интенсивность напряжений, вызванных волной сжатия, и процесс разрушения носит иной характер. Частицы породы, вовлеченные в движение волной сжатия, продолжают перемещаться вдоль радиусов, исходящих из центра взрыва. В результате каждый элементарный сферический слой в поперечном разрезе полости заряда, мысленно выделяемый в среде, растягивается, увеличивая свой радиус, что приводит к появлению системы радиальных трещин, расходящихся во все стороны от заряда. Нарушение сплошности материала пород в зоне происходит путем образования трещин, направленных по нормальям к поверхности скважины. Появление радиальных трещин обусловлено наличием тангенциальных растягивающих напряжений, превышающих предел прочности материала горных пород на разрыв (растяжение). При дальнейшем удалении от центра камуфлетного взрыва снижаются деформации, вызванные растягивающими напряжениями, и образование новых трещин прекращается. Однако возникшие ранее трещины могут распространяться еще на некоторое расстояние благодаря перераспределению напряжений около их концов, где происходит концентрация растягивающих усилий. Размеры зоны радиальных трещин зависят от природной трещиноватости массива пород, их физико-механических и горнотехнологических свойств, передачи энергии взрыва ВВ в ударную и волну напряжений, а также времени их воздействия на среду. На размеры этих зон существенное влияние также оказывают и расширяющиеся газообразные продукты взрыва.

В остальной части среды, за пределами отмеченных зон, волна сжатия приводит к накоплению некоторого запаса потенциальной энергии упругой деформации, которая реализуется в работу разрушения лишь при наличии свободной поверхности. В этом случае при достижении волной сжатия свободной поверхности частицы приграничного слоя получают возможность расширяться в ее сторону. Такое расширение породы будет передаваться все более удаленным слоям среды. В результате возникает волна растяжения (или отражения), распространяющаяся от свободной поверхности вовнутрь массива многоярусного рудного штабеля. Эта волна вызывает растягивающее напряжение в породе, а так как предел прочности горных пород на разрыв в несколько раз ниже предела их прочности на сжатие, то это приводит к интенсивному разрушению среды. Трещины, образовавшиеся под действием волны растяжения, развиваются перпендикулярно направлению ее распространения.

Участок породы, ограниченный с одной стороны зоной радиальных трещин, а с другой – зоной трещин, идущих от свободной поверхности, разрушается под совокупным действием волновых процессов и газообразных продуктов взрыва [2].

В условиях всестороннего взрывного нагружения, по аналогии с работами [2, 3], расширение полости скважины прекратится при наличии большого внутреннего трения в раздробленной (сыпучей) среде, когда статически напряженное состояние, обусловленное прочностью среды, будет в состоянии удерживать давление продуктов детонации.

Чтобы вычислить величину максимального давления в полости скважины в ограниченной среде, которую способны удержать силы, обусловленные прочностью среды, положим, что взрыв в каждом элементарном слое по высоте заряда произошел мгновенно. Рассмотрим сечение заряда, находящееся на достаточном расстоянии от его концов. Среду в направлении радиуса слоя будем считать бесконечно протяженной. Решение, полученное при этих допущениях, будет соответствовать взрыву достаточно длинного цилиндрического заряда в ограниченной среде.

Будем считать, по В. Н. Родионову, что разрушение скальной породы происходит при постепенном нарастании давления внутри полости, от бесконечности к оси заряда, в безграничной среде [4]. При малых давлениях в полости скважины скальный массив горных пород можно рассматривать как квазиупругую среду. В этом случае с повышением давления на границе полости будут расти растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения.

При достижении тангенциальными напряжениями σ_θ некоторого предельного значения $[\sigma_p]$ на границе полости появляются трещины, направленные по радиусу. Протяженность каждой отдельной трещины значительно меньше радиуса зоны трещинообразования. Это необходимое условие сохранения симметрии зоны разрушения и того, что граница зоны определяется значением тангенциального напряжения, равным пределу прочности породы на растяжение.

При дальнейшем повышении давления в полости скважины образуемые радиальными трещинами и природной трещиноватостью конические куски породы начнут раздавливаться. С ростом давления зона раздавливания будет расширяться. Причем в конце зоны раздавливания радиальные напряжения σ_r достигнут некоторой предельной величины $[\sigma_c]$, соответствующей пределу прочности на одноосное сжатие.

Исходя из описанной схемы разрушения, уравнение равновесия, выраженное через смещение $u = u(r)$, для квазиупругой области в случае осевой симметрии имеет вид:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0,$$

где r – текущий радиус.

Это обыкновенное линейное уравнение второго порядка, общий интеграл которого выражается как

$$u = Ar + B/r,$$

где A и B – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

Для нахождения постоянных интегрирования необходимо учитывать следующие граничные условия: об ограниченности смещения на бесконечности; на внешней границе зоны радиальных трещин тангенциальное напряжение принимает предельное значение $[\sigma_p]$:

$$u = 0 \text{ при } r = \infty; \quad \sigma_\theta = [\sigma_p] \text{ при } r = r_1,$$

где σ_θ – тангенциальное напряжение; r_1 – радиус зоны радиальных трещин.

Из первого граничного условия следует, что $A = 0$. Для нахождения постоянной интегрирования B воспользуемся положениями теории прочности Кулона–

Мора, согласно которой тангенциальные напряжения σ_θ могут быть представлены в следующем виде:

$$\sigma_\theta = \frac{EB}{(1+\nu)r^2} \quad \text{или} \quad \sigma_\theta = \frac{Eu}{(1+\nu)r},$$

где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона.

Однако в квазиупругой области массива, представляющей собой сжатую взрывом область, для тангенциальных напряжений σ_θ и границы перемещения по аналогии с моделью несвязанной сыпучей среды Феннера–Руппенейта при величине угла внутреннего трения $\varphi = 30^\circ$, что характерно для песка, будем иметь:

$$\sigma_\theta = [\sigma_p] \left(\frac{r_1}{r} \right)^2 \quad \text{или} \quad u = \frac{1+\nu}{E} [\sigma_p] \frac{r_1^2}{r}.$$

Смещение границы квазиупругой зоны при $r = r_1$ будет следующим:

$$u_1 = \frac{1+\nu}{E} [\sigma_p] r_1. \quad (1)$$

Оно определяет расстояние, на которое сместилась граница из-за деформирования квазиупругой зоны, причем в ближней к заряду зоне радиальных трещин $\sigma_\theta = 0$, тогда уравнение равновесия в рассматриваемой зоне с учетом радиальных напряжений σ_r будет иметь следующий вид:

$$\sigma_r + r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0. \quad (2)$$

Решением уравнения (2) является:

$$\sigma_r = Cr^{-1}.$$

Граничное условие для внутренней границы этой зоны (нахождения постоянной C) такое:

$$\sigma_r = [\sigma_C] \quad \text{при} \quad r = r_2, \quad (3)$$

где r_2 – радиус зоны раздавливания (сжатия).

В силу зависимости (3) распределение напряжений в этой зоне подчиняется закономерности:

$$\sigma_r = [\sigma_C] (r_2/r). \quad (4)$$

Для установления связи между r_1 и r_2 рассмотрим систему уравнений, связывающую радиальные и тангенциальные напряжения с перемещениями в зоне сжатия и в квазиупругой зоне:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} \right); \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{u}{r} + \nu \frac{du}{dr} \right). \end{cases}$$

Так как в этой области $\sigma_\theta = 0$, то

$$\sigma_r = -\frac{E}{\nu} \cdot \frac{u}{r}. \quad (5)$$

Используя свойство неразрывности границы между квазиупругой зоной и зоной сжатия (в пластической зоне), т. е. условие непрерывности смещения на границах, и подставляя (1) в выражение (5), получаем:

$$\sigma_r = -\frac{E}{\nu} \cdot \frac{u_1}{r_1} = -\frac{1+\nu}{\nu} [\sigma_p]. \quad (6)$$

На основании (3), (4) с учетом (6) имеем:

$$[\sigma_c] r_2 = \frac{1+\nu}{\nu} [\sigma_p] r_1. \quad (7)$$

Радиальное напряжение в рассматриваемой пластической зоне приблизительно можно связать с деформацией, используя закон Гука, так как рассматриваем квазиупругую зону [5], т. е. $\sigma_r = E\varepsilon_r$. Тогда распределение деформации имеет вид:

$$\varepsilon_r = \frac{[\sigma_c]}{E} \cdot \frac{r_2}{r}.$$

Перемещение u_r внутренней границы радиальных трещин (пластической зоны) под действием напряжения определяется выражением:

$$u_2 = u_1 + \int_{r_2}^{r_1} \varepsilon_r dr = \frac{1+\nu}{E} [\sigma_p] r_1 + \frac{1}{E} [\sigma_c] r_2 \ln \frac{r_1}{r_2}.$$

С учетом зависимости (7) имеем:

$$u_2 = \frac{[\sigma_c]}{E} r_2 \left\{ \nu + \ln \left(\frac{\nu}{1+\nu} \frac{[\sigma_c]}{[\sigma_p]} \right) \right\}.$$

Так как для несвязанных горных пород второй член равен $\ln \left(\frac{\nu}{1+\nu} \frac{[\sigma_c]}{[\sigma_p]} \right) \approx 1$, окончательно имеем:

$$u_2 = \frac{[\sigma_c]}{E} r_2 (\nu + 1).$$

В зоне сжатия (раздавливания) с определенной степенью точности может быть использован первый инвариант тензора напряжений [6]:

$$\sigma_r - 2\sigma_\theta = 0. \quad (8)$$

Пользуясь уравнением равновесия:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0,$$

с учетом того, что радиальное напряжение на внешней границе рассматриваемой зоны ($r = r_2$) известно, получим:

$$\sigma_r = [\sigma_C] (r_2/r)^{1/2}.$$

При этом давление на стенки цилиндрической полости скважины с радиусом r_n составит:

$$P = [\sigma_C] (r_2/r_n)^{1/2}. \quad (9)$$

Применив закон неразрывности, который справедлив в зоне сжатия (раздавливания), определим соотношение r_2/r_n .

Объемная деформация, как известно, равна:

$$\Delta = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z}{3K} = \frac{3[\sigma_C]}{4K} \sqrt{\frac{r_2}{r}}, \quad (10)$$

где K – модуль всестороннего сжатия, $K = E/(3(1 - 2\nu))$.

При выводе зависимости (10) использованы известные положения из теории упругости и пластичности [3] о том, что при цилиндрической симметрии $\sigma_z = (\sigma_r + \sigma_\theta)/2$, а также условие $\sigma_r = 2\sigma_\theta$ из формулы (8) с учетом сыпучей среды (например, измельченной горной породы).

Поскольку сжимаемость материала $\Delta = \rho_1/\rho_0 - 1$, то из закона объемного деформирования получим:

$$\rho_1 = \rho_0 + \frac{3[\sigma_C]}{4K} \sqrt{\frac{r_2}{r}},$$

где ρ_0, ρ_1 – плотность до и после деформации.

Уравнение неразрывности или баланса массы имеет вид:

$$\rho_0 (r_2^2 - r_0^2) = 2 \int_{r_0}^{r_n} \rho_1 r dr, \quad (11)$$

где r_0 – радиус заряда; r_n – радиус образовавшейся полости скважины.

Интегрирование выражения (11) в указанных пределах имеет вид:

$$\frac{r_2}{r_n} = \sqrt{1 + \frac{[\sigma_C]}{K} \sqrt{\frac{r_2}{r}} - \left(\frac{r_0}{r_g}\right)^2} \left/ \left[\left(1 + \frac{1+\nu}{E} [\sigma_C]\right)^2 - 1 + \frac{[\sigma_C]}{K} \left(1 + \frac{1+\nu}{E} [\sigma_C]\right)^{3/2} \right] \right.,$$

где r_g – радиус пластической зоны вокруг скважины.

Разложив в ряд слагаемые в знаменателе и ограничившись членами первого порядка малости, получим:

$$\frac{r_2}{r_n} = \sqrt{1 + \frac{[\sigma_C]}{K} \sqrt{\frac{r_2}{r}} - \left(\frac{r_0}{r_g}\right)^2} \left/ \left(2 \frac{1+\nu}{E} [\sigma_C] + \frac{[\sigma_C]}{K}\right) \right.$$

Максимальное значение давления, удерживаемого средой, достигается при $r_0/r_n \rightarrow 0$. Следовательно,

$$\frac{r_2}{r_n} = \sqrt{1 + \frac{[\sigma_c]}{K}} \sqrt{\frac{r_2}{r_n}} / \left(2 \frac{1+\nu}{E} [\sigma_c] + \frac{[\sigma_c]}{K} \right). \quad (12)$$

С учетом того, что $K = 5/6(E)$, а $E = 3/4(\rho_0 c^2)$ при $\nu = 0,3$ и $\rho_0 c^2$ (c – скорость продольных волн при взрыве) для горных пород на два-три порядка больше $[\sigma_c]$, вторым слагаемым в числителе подкоренного выражения можно пренебречь. Тогда из уравнения (12) имеем:

$$\frac{r_2}{r_n} = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{\rho_0 c^2}{(3,2 + 2\nu)[\sigma_c]}}.$$

В соответствии с этим максимальное давление в цилиндрической полости при $\nu = 0,3$ (что соответствует несвязанной среде), с учетом формулы (9) равняется:

$$P_c = [\sigma_c]^4 \sqrt{\frac{\rho_0 c^2}{5[\sigma_c]}}. \quad (13)$$

Выражение (13) получено из рассмотрения квазистатического расширения полости, которое имеет место на заключительной стадии взрыва [3], поскольку в начальный момент действие взрыва на стенки полости носит ударный характер.

В работе [7] обосновано, что динамические напряжения, возникающие при динамическом (ударном) давлении на твердое упругое тело, могут быть определены по формуле:

$$\sigma_d = \sigma_{ст} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{T_0}{U_c(1+\beta)} - k_d \sigma_{ст}} \right], \quad (14)$$

где $\sigma_{ст}$ – напряжение в упругом теле при статическом приложении нагрузки; T_0 – кинетическая энергия ударяющего тела (в данном случае продукты детонации) к моменту начала удара; U_c – потенциальная энергия деформации породы; β – отношение массы ударяемого тела (окружающей полость породы) к массе ударяющего тела (заряда ВВ); k_d – коэффициент динамичности.

Так как отношение массы отбиваемой части массива к массе заряда в обычных условиях взрывания составляет не менее $3 \cdot 10^3$, а отношение T_0/U_c не превышает одного порядка, то величина $T_0/U_c(1+\beta)$ будет весьма малой [7]. В результате коэффициент динамичности в начале действия взрывной нагрузки по формуле (14) будет равен 2.

С учетом того что к моменту достижения полостью предельного положения расширение носит статический характер, средний коэффициент динамичности на протяжении всего этого процесса можно принять равным 1,5.

Обоснованность расчета аналитического значения коэффициента подтверждается экспериментами. Так, разрушающее напряжение при взрывном нагружении для стекла увеличивается на 50 %, полиметилметакрилата – на 65 %. Согласно данным [4], динамический предел прочности чугуна увеличивается в 1,5 раза по сравнению со статическим, меди – в 1,35 раза, магниевых сплавов – в 1,25 раза.

В соответствии с изложенным максимальное давление в полости, образованной при взрыве цилиндрического заряда, с учетом коэффициента динамичности можно принять:

$$P_c = k_d [\sigma_c] \sqrt[4]{\frac{\rho_0 c^2}{5k_d [\sigma_c]}}$$

Таким образом, установлено, что прочностная характеристика массива горных пород в многоярусном рудном штабеле зависит от сжимаемости (ρ_1/ρ_0), энергетических характеристик применяемого ВВ и динамического предела прочности породы на сжатие (раздавливание). Она показывает, во сколько раз увеличивается сопротивляемость пород разрушению в ближней зоне взрыва при всесторонней динамической нагрузке. Эта характеристика различна для разных типов горных пород и определяется их физико-механическими свойствами.

Для разрушенных горных пород многоярусного рудного штабеля из-за шероховатости кусков и наличия сил зацепления между ними также существует прочность при одноосном сжатии и растяжении. Однако растяжение экспериментально определить очень сложно. Поэтому для построения паспорта прочности опытным путем определяют величину сцепления (прочность на сдвиг). При этом следует обратить внимание на то, что угол внутреннего трения разрушенной породы всегда больше, чем идеально сыпучей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Покровский Г. И., Федоров И. С. Действие удара взрыва в деформируемых средах. М.: Промстройиздат, 1957. 276 с.
2. Ракишев Б. Р. Энергоемкость механического разрушения горных пород. Алматы: Баспагер, 1998. 210 с.
3. Механический эффект подземного взрыва / В. Н. Родионов [и др.]. М.: Недра, 1971. 200 с.
4. Ракишев Б. Р. Прогнозирование технологических параметров взорванных пород на карьерах. Алма-Ата: Наука, 1983. 240 с.
5. Кутузов Б. Н., Рубцов В. К. Физика взрывного разрушения горных пород применительно к взрывным работам // Взрывное дело. 1963. № 53/10. С. 31–36.
6. Казаков Н. Н. Взрывная отбойка руд скважинными зарядами. М.: Недра, 1975. 190 с.
7. Беленко Ф. А. Исследование полей напряжения и процесса образования трещин при взрыве колонковых зарядов в скальных породах // Вопросы теории разрушения горных пород под воздействием взрыва. М.: Недра, 1958. С. 126–139.

Поступила в редакцию 12 февраля 2018 года

ANALYTICAL RESEARCHES OF DETERMINATION OF PARAMETERS OF CAVITIES CREATED IN THE MULTI-TIERED ORE STACK FOR HEAP LEACHING OF GOLD AT VERTICAL BOREHOLES CAMOUFLET EXPLOSION

Borovkov Iu. A. – Russian State Geological Prospecting University, Moscow, the Russian Federation. E-mail: bua_51@mail.ru

Dereviashkin I. V. – Moscow Polytechnic University, Moscow, the Russian Federation. E-mail: gornoedelo-um@mail.ru

Iakshibaev T. M. – Russian State Geological Prospecting University, Moscow, the Russian Federation. E-mail: bua_51@mail.ru

The article considers the use of new rational methods on the intensification of the process of heap leaching of gold by means of shaking multi-tiered ore stack with a blast of camouflet borehole charge. Mechanism of camouflet blasting of explosive in granular medium has been analytically researched, its basic parameters have been substantiated, strength characteristics of rock mass in multi-tiered ore stack have been determined for heap leaching, depending on compressibility, power characteristics of the used explosive material and dynamic limit of rock compressive strength (thrust). This characteristic shows, how many times rock resistance to the nearest explosion zone increases under overall dynamic loading; it varies for different types of rocks and is determined by their physical-mechanical properties. At that, for destructed rocks of multi-tiered ore stack, through the lumps roughness and the presence of the powers of gripping between them, strengths at uniaxial compression and extension do exist. However, the latter value is difficult to determine

experimentally. Therefore, to build the certificate of rock strength, the value of gripping (shear resistance) is determined experimentally. At that, it should be noted that the angle of shearing resistance of destructed rock is always bigger than of ideal loose one.

Key words: heap leaching; multi-tiered ore stack; intensification; shake; camouflet borehole charge.

REFERENCES

1. Pokrovskii G. I., Fedorov I. S. *Deistvie udara vzryva v deformiruemykh sredakh* [Percussion blow action in deformed environments]. Moscow, Promstroizdat Publ., 1957. 276 p.
 2. Rakishev B. R. *Energoemkost' mekhanicheskogo razrusheniia gornyykh porod* [Energy capacity of mechanical destruction of rock]. Almaty, Baspager Publ., 1998. 210 p.
 3. Rodionov V. N., and others. *Mekhanicheskii effekt podzemnogo vzryva* [Mechanical effect of camouflet explosion]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 200 p.
 4. Rakishev B. R. *Prognozirovaniye tekhnologicheskikh parametrov vzorvannykh porod na kar'erakh* [Forecast of technological parameters of blasted rock at open pits]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1983. 240 p.
 5. Kutuzov B. N., Rubtsov V. K. [Physics of explosive destruction of rock as applied to blasting operations]. *Vzryvnoe delo – Explosion Technology*, 1963, no. 53/10, pp. 31–36. (In Russ.)
 6. Kazakov N. N. *Vzryvnaia otboika rud skvazhinnyimi zariadami* [Explosive breaking up of ore using borehole charges]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 190 p.
 7. Belenko F. A. [Investigation of stress fields and the process of fissures generation during column charges blasting in hard rock]. *Voprosy teorii razrusheniia gornyykh porod pod vozdeistviem vzryva* [Problems of the theory of rock destruction under the action of a blast]. Moscow, Nedra Publ., 1958, pp. 126–139.
-