

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ КВАРЦА ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛОСКОЙ СИСТЕМЫ РАССРЕДОТОЧЕННЫХ ЗАРЯДОВ

СОКОЛОВ И. В., СМЕРНОВ А. А., РОЖКОВ А. А.

В статье представлены результаты комплексных исследований буровзрывных работ при добыче высокоценного гранулированного кварца подземным способом в условиях Кыштымского месторождения. Проведены теоретические изыскания технологии и параметров взрывной отбойки, направленные на решение проблемы переизмельчения кварца. Установлено, что снизить выход мелких фракций можно за счет эффекта взаимодействия одновременно взрывааемых скважинных зарядов в веере, а рассматривать их взаимодействие следует как плоскую систему зарядов. Представлен основной критерий действия плоской системы зарядов, расположенных веерообразно, по которому определен диапазон геометрических параметров расположения зарядов в массиве. Предложена и опробована конструкция зарядов, рассредоточенных воздушными промежутками без инертного заполнителя. В натурных условиях подземного рудника проведены экспериментальные взрывы и получены результаты по предложенной технологии отбойки с различными конструктивными и энергетическими параметрами.

Ключевые слова: месторождение кварца; буровзрывные работы; переизмельчение; плоская система зарядов; рассредоточение.

Кыштымское месторождение является единственным в России эксплуатируемым месторождением высокоценного гранулированного кварца – сырья для инновационных отраслей промышленности [1]. Уникальность месторождения обусловлена высоким содержанием и химической чистотой полезного компонента в рудном теле, а также запасами, в разы превосходящими другие разведанные месторождения кварца, пригодного для производства особо чистых концентратов (ОЧК) [2]. Одним из источников потерь при добыче является переизмельченная фракция –20 мм, образующаяся в результате взрывной отбойки и непригодная для производства ОЧК [3].

Верхняя часть рудного тела была отработана карьером, после чего осуществлен переход на подземный способ добычи и применена камерная система разработки с оставлением неизвлекаемых целиков [4]. Отбойка производилась рассредоточенными зарядами патронированного взрывчатого вещества (ВВ) в веерах скважин диаметром 105 мм и длиной до 10 м. В качестве инертного заполнителя воздушных промежутков использовалась глиняная забойка. Зарядка производилась вручную. При линии наименьшего сопротивления (ЛНС) и расстоянии между концами скважин 2,0–2,5 м удельный расход ВВ составлял 0,9–1,0 кг/м³. Применялось короткозамедленное взрывание. Такой способ отбойки в зависимости от естественной нарушенности массива позволял получить выход некондиционной фракции в пределах 16–20 %. Данный показатель неприемлем на современном этапе освоения

Соколов Игорь Владимирович – доктор технических наук, заведующий лабораторией подземной геотехнологии. 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Институт горного дела УрО РАН. E-mail: geotech@igduran.ru

Смирнов Алексей Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии. 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Институт горного дела УрО РАН. E-mail: geotech@igduran.ru

Рожков Артем Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии. 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Институт горного дела УрО РАН. E-mail: 69artem@bk.ru

месторождения. Таким образом, совершенствование технологии ведения буровзрывных работ (БВР) является актуальной научно-технической задачей.

Помимо переизмельчения при отбойке, среди недостатков существующей технологии отмечены:

- расположение буровых выработок, при проходке которых кварц в основном переизмельчался, непосредственно в рудном теле;
- способ заряжания, излишне трудоемкий и практически не осуществимый при большей длине взрывных скважин и меньшем их диаметре.

При новой технологии отработки месторождения комбинированной системой разработки [5] первый недостаток устранен расположением единой для всего подэтажа буровой выработки по простиранию в породах лежачего бока, второй – использованием гранулированного ВВ и механизацией процесса его зарядки в скважины длиной до 25 м и диаметром 65–105 мм.

Для определения рационального способа отбойки и конструкции зарядов проведены изыскания, исходящие из учета следующих факторов:

- негативное влияние сплошной конструкции зарядов;
- значительная трещиноватость массива жилы;
- склонность к переизмельчению, определяемая структурой кварца, сложенного из отдельных зерен (гранул) размером 1–2 мм.

Исследованиями [6] установлено, что отбойка трещиноватых руд требует уменьшенного расхода ВВ, поскольку разрушение массива в первую очередь происходит по естественным трещинам. Известно также, что при взрыве удлиненных зарядов в горной породе основной объем разрушений приходится на зону радиальных трещин [7]. При групповом мгновенном взрывании близкорасположенных зарядов среда отрывается от массива по линии их расположения до того, «как успеют развиться другие трещины» [8]. По плоскости расположения взаимодействующих зарядов прорастает магистральная трещина, вокруг которой не происходит интенсивного дробления [9]. При веерном расположении скважин время образования трещин по линии отрыва значительно меньше, чем в направлении ЛНС. С формированием общей щелевидной полости резко снижается давление газов [10].

Обобщая сказанное, можно сделать следующие выводы:

- взрываемую единовременно группу зарядов в веере следует рассматривать как плоскую систему зарядов (ПСЗ) [11, 12];
- при подходящих конструкции и энергетических параметрах зарядов за счет использования при отбойке кварца эффекта ПСЗ можно обеспечить снижение выхода некондиционной фракции.

Отделение отбиваемого слоя от массива определяется давлением продуктов детонации на стенки образовавшейся общей щелевидной полости P_0 , МПа. В общем случае [13]:

$$P_0 = 0,5\rho_{\text{ВВ}}D^2(i+1)^{-1},$$

где D – скорость детонации ВВ, м/с; $\rho_{\text{ВВ}}$ – плотность ВВ, кг/м³; i – показатель полнотропы газов взрыва.

В данном случае характерной величиной является давление на стенки объединенной полости взрыва в зоне забоев скважин веера P , МПа, поскольку именно там наибольшее расстояние между зарядами и наименьший удельный расход ВВ:

$$P = P_0 \left[n\pi r^2 (n\pi r^2 + 2\Delta u B)^{-1} \right]^i, \quad (1)$$

где n – количество скважин в веере, шт.; r – радиус зарядов, м; Δu – смещение стенки щелевидной полости, м; B – ширина веера, м.

Определение величины Δu , обеспечивающей проникновение в трещину газов взрыва и выравнивание в ней давления, требует проведения специальных исследований. Вследствие этого принято допущение, что $\Delta u = 1$ мм.

Поскольку n зависит от расстояния между концами скважин, одним из критериев взаимодействия зарядов является эффект пробоя массива по плоскости их расположения. Минимальная предельная величина пробивного расстояния $L_{пр}$, м, между двумя одновременно взрывающимися зарядами в массиве кварца зависит от радиуса зарядов и скорости детонации ВВ (граммонит 21ТМЗ) и рассчитывается по формуле [14]:

$$L_{пр} = 4r \left\{ \pi P_0 |\sigma_p|^{-1} \left[1 + (1 + 4iP_0\mu^{-1})^{0,5} \right]^{-1} \right\}^{0,5},$$

где $|\sigma_p|$ – предел прочности кварца на растяжение, МПа; μ – модуль сдвига среды, МПа.

Максимальное пробойное расстояние может быть принято $L_{max} = L_{пр} \sqrt{2}$ [14]. Можно предположить, что опережающий рост магистральной трещины по плоскости расположения скважин происходит при всех практических параметрах и находится в интервале 2,2–3,2 м.

Очевидно, полный отрыв отбиваемого слоя произойдет при некотором минимально необходимом давлении P_{min} , МПа, на стенки общей полости взрыва. Для определения значения данной величины использована методика [15]:

$$P_{min} = |\sigma_{сж}| M_{сж} \left[(2\pi(1-\alpha^2)\rho_{ВВ}W) \left((1-\alpha^2)\rho_{зар}BF(t) \right)^{-1} \right]^{0,5}; \quad (2)$$

$$t = AB^{-1}; \quad M_{сж} = k^{-1} \left[1 + ((2\eta - 1)(1 - \alpha) + 2\alpha(1 + \alpha\eta)) (2(1 - \alpha + \alpha^2)\sigma_{сж})^{-1} \right],$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности кварца на сжатие, МПа; $M_{сж}$ – коэффициент, учитывающий напряжения в точках, лежащих на проектных зонах разрушения; α – коэффициент бокового распора; $\rho_{зар}$ – плотность заряжения, кг/м³; W – ЛНС, м; A – высота веера, м; $F(t)$ – функция от соотношения высоты и ширины веера; k – коэффициент, характеризующий наибольшую степень расхождения энергии взрыва в краевой части отбиваемого слоя в зависимости от параметров W и B , $k = 0,71-0,90$; η – коэффициент, $\eta = (1 + \sin\varphi)(1 - \sin\varphi)^{-1}$; φ – коэффициент внутреннего трения кварца.

Из зависимостей (1) и (2) получаем, что при ЛНС от 1,5 до 3,0 м расстояние между концами скважин может достигать 3,5 м. В этом случае P_{min} будет иметь значение, при котором обеспечивается полнота отрыва слоя руды. Учитывая величину L_{max} , целесообразно принять максимальное расстояние между скважинами для всех ЛНС равным 3,2 м.

Сплошные скважинные заряды, несмотря на наибольшее распространение в практике ведения взрывных работ, наименее эффективны с точки зрения механики дробления [16]. Помимо опыта отбойки при отработке переходной зоны зарядами с глиняными промежутками, в 1980-е гг. на месторождении проводились исследования скважинной отбойки в карьере и шпуровой при проходке разведочных выработок по кварцу. Установлено, что сплошная конструкция заряда при удельном расходе ВВ 0,9 кг/м³ обязательно связана со значительным переизмельчением кварца (выход фракции 0–5 мм составляет 37 %). В то же время снижение удельного расхода ВВ может привести не только к повышенному выходу негаба-

рита, но и к «прострелу», когда слой породы не отбивается от массива. Взрывание зарядов с пористыми промежутками и стержнями позволило получить равномерное дробление массива с малым содержанием мелких фракций [17, 18].

Известно, что рассредоточение заряда позволяет снизить начальное давление продуктов детонации на поверхность стенок скважины, удлинняя время воздействия взрыва на разрушаемую породу, уменьшает бризантное действие взрыва, связанное с переизмельчением материала в ближней зоне, и способствует более равномерному дроблению породы [19].

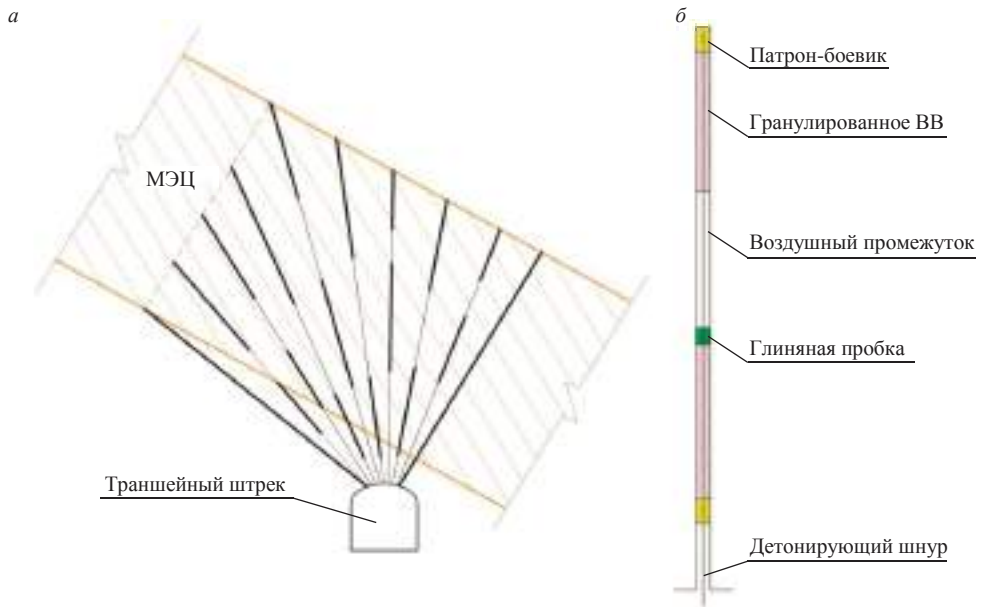


Рис. 1. Принципиальная схема заряжения веера – а; конструкция заряда в скважине – б:
МЭЦ – междуэтажный целик

Формирование рассредоточенных зарядов производится самыми различными способами [20–22], имеющими как достоинства, так и недостатки, главный из которых в том, что предназначены они преимущественно для открытых горных работ. В подземных условиях возможная область их применения ограничивается зарядкой нисходящих вертикальных скважин увеличенного диаметра. При расположении скважин в виде восходящего веера данные способы неприменимы либо сложно осуществимы. Таким образом, возникла необходимость в разработке конструкции рассредоточенного заряда, отвечающей горнотехническим условиям [23]. Важно отметить, что рациональной конструкцией является заряд, разделенный именно воздушным промежутком, а не забоечным или каким-либо другим инертным материалом [24]. В результате была предложена и опробована конструкция с воздушными промежутками без инертного заполнителя (рис. 1).

Заряжание осуществлялось следующим образом: в забое скважины размещался патрон-боевик с присоединенным детонирующим шнуром. Пневмозарядчиком подавался первый заряд гранулированного ВВ необходимой длины. Зарядный шланг извлекался из скважины и в нее этим же шлангом вводилась влажная глиняная пробка длиной 10–20 см на расстояние, обеспечивающее образование воздушного промежутка после первого заряда. Контроль необходимых расстояний осуществлялся по маркированному зарядному шлангу. Глиняная пробка фиксировалась на необходимой глубине в скважине легкими ударами шланга.

Мягкий материал легко расклинивался в скважине. После этого производилось заряжание следующей порции ВВ.

Практика показала, что пробка надежно удерживается на своем месте. После заряжания ВВ уплотняется и не может просыпаться в сформированный ниже воздушный промежуток, следовательно, не нуждается в забойке со стороны устья скважины. Данный способ заряжания отличается простотой и не требует никаких дополнительных специальных средств.

Для оценки получаемого гранулометрического состава отбиваемой руды были применены методы ситового анализа и фотопланиметрии [25]. Выборка проб от генеральной совокупности составляла 5 % и более, что отвечает требованиям [26], а их отбор проводился погрузочно-доставочной машиной (ПДМ) по мере выпуска отбитого слоя. Замер объемов фракций после разделения осуществлялся с учетом коэффициентов разрыхления, характерных для каждой из них.

Первый экспериментальный взрыв производился с ЛНС = 1,6 и расстоянием по концам скважин 2,2 м. Конструкция зарядов применялась сплошная при диаметре скважин 65 мм и удельном расходе ВВ на отбойку 1,55 кг/м³. Выход некондиционной фракции составил 25 % при низком выходе негабарита (менее 5 %). Для веера скважин был подтвержден вывод [18] о том, что сплошная конструкция заряда крайне неэффективна и не позволяет значительно снизить удельный расход ВВ.

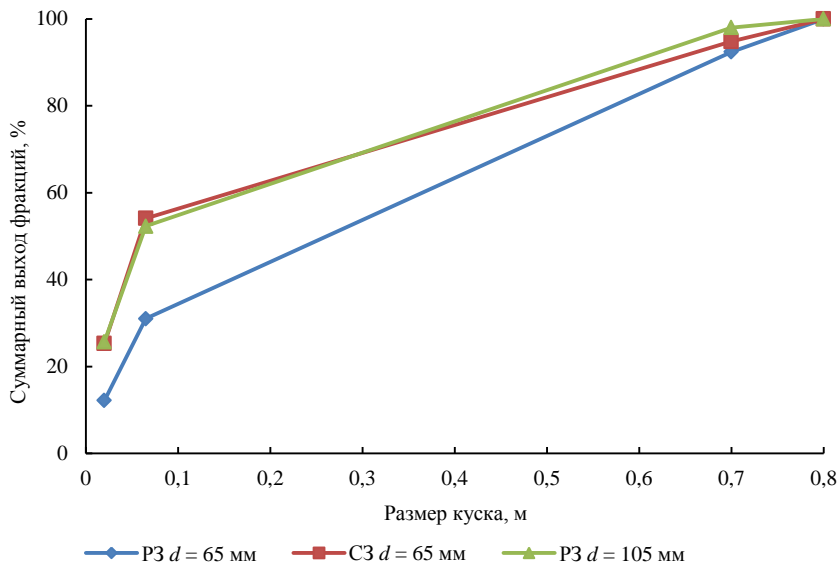


Рис. 2. Зависимость суммарного выхода фракций кварца от конструкции зарядов в веере

Проведено сравнение взрывов ПСЗ следующих конструкций:

- рассредоточенные заряды диаметром 65 мм (P3 $d = 65$ мм);
- сплошные заряды диаметром 65 мм (C3 $d = 65$ мм);
- рассредоточенные заряды диаметром 105 мм (P3 $d = 105$ мм).

Отметим, что в процессе предобогащения кварцевая руда в первую очередь разделяется на две фракции +65 и –65 мм. Фракция +65 мм не требует дополнительных операций (негабарит вывозится на поверхность после вторичного дробления) и сразу отправляется на обогатительную фабрику, а –65 мм подвергается еще одному процессу – грохочению, с целью выделения непригодной для

обогащения фракции -20 мм. Сравнение результатов (рис. 2) показало, что РЗ $d = 65$ мм позволил получить более качественное дробление, в то время как результаты взрывов СЗ того же диаметра и РЗ $d = 105$ мм значительно хуже и сопоставимы между собой. При РЗ $d = 65$ мм доля мелких фракций -20 мм и $+20-65$ мм меньше в отличие от СЗ $d = 65$ мм и РЗ $d = 105$ мм (на 13–14 и 8–10 % соответственно), а доля $+65-700$ мм значительно выше (на 15–20 %).

Всего проведено 7 экспериментальных взрывов с разными конструкциями зарядов и удельным расходом ВВ. В результате установлена зависимость гранулометрического состава от удельного расхода ВВ (рис. 3). Выход 12 % некондиционной фракции и 7–10 % негабаритной достигается при удельном расходе ВВ на отбойку около $0,9$ кг/м³. По сравнению с ранее применяемой технологией БВР, где удельный расход ВВ также был $0,9$ кг/м³, доказана возможность снижения переизмельчения на 25–40 %.

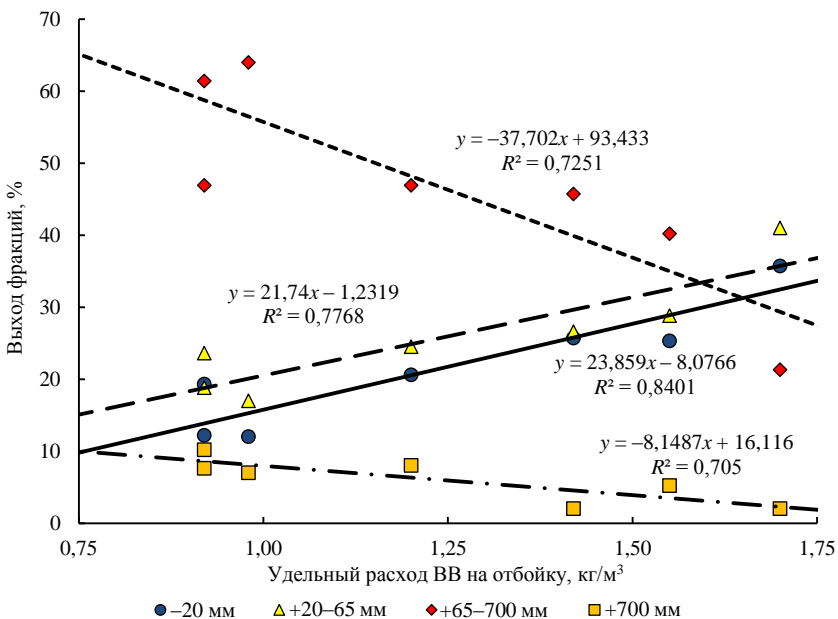


Рис. 3. Гранулометрический состав отбитой руды в зависимости от удельного расхода ВВ

Вместе с тем картина разрушения массива взрывом взаимодействующих веерных зарядов наглядно показала, что происходит откол слоя по плоскости расположения скважин при отсутствии зон мелкого дробления вблизи зарядов, что подтвердило результаты, полученные в работах [27, 28] (рис. 4).

Известно, что «при взрыве сплошного скважинного заряда образуется максимальный объем не только мельчайших, но и крупных фракций, а выход негабарита может достигать 15 % и более» [16]. Однако при отбойке кварца такими зарядами, где удельный расход ВВ был значительно больше, нежели при рассредоточении, выход негабарита был минимальным. При рассредоточении наблюдалась обратная картина – снижение мощности взрыва влекло за собой повышение выхода негабарита. Выход мелких фракций кварца происходит вследствие удара отбитого слоя руды о стенки камеры и соударения кусков между собой. Очевидно, что степень этого воздействия прямо пропорциональна мощности взрыва, т. е. удельному расходу ВВ на отбойку.

Основные выводы по результатам проведенных исследований:

– применение плоской системы рассредоточенных зарядов с минимально необходимыми для отрыва энергетическими показателями может обеспечить снижение выхода переизмельченной фракции до 12 %;

– при взрыве плоской системы рассредоточенных зарядов не происходит интенсивного дробления кварца в ближней зоне взрыва, в том числе непосредственно вокруг зарядов;



Рис. 4. Откол слоя по плоскости расположения скважин при отсутствии зон мелкого дробления вблизи зарядов:
а – на поверхности негабарита; б – в забое камеры

– величина выхода мелкой фракции определяется интенсивностью удара, зависящей от мощности взрыва, т. е. от удельного расхода ВВ; снижение удельного расхода ВВ до $0,9 \text{ кг/м}^3$ достигается конструкцией зарядов с воздушными промежутками и ограничено выходом негабарита (7–10 %).

Исследования выполнены при поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований УрО РАН «Исследование переходных процессов и учет закономерностей их развития при разработке инновационных технологий оценки, добычи и рудоподготовки минерального сырья» (15-11-5-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов И. В., Корнилов С. В., Сашурин А. Д., Кузьмин В. Г., Шемякин В. С. О формировании научно-технологического задела для внедрения комплексной геотехнологии добычи и переработки высокоценного кварца // Горный журнал. 2014. № 12. С. 44–48.

2. Минералургия жильного кварца / под ред. В. Г. Кузьмина, Б. Н. Кравца. М.: Недра, 1990. 294 с.
3. Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Барановский К. В., Рожков А. А. Ресурсосберегающая технология подземной разработки месторождения высокоценного кварца // ФТПРПИ. 2015. № 6. С. 133–145.
4. Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Барановский К. В. Совершенствование технологии опытно-промышленной отработки переходной зоны Кыштымского месторождения кварца // ГИАБ. 2014. № 6. С. 183–189.
5. Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Барановский К. В., Рожков А. А. Выбор оптимального варианта комбинированной системы разработки месторождения высокоценного кварца на основе моделирования // ФТПРПИ. 2016. № 6. С. 124–133.
6. Калмыков В. Н., Пергамент В. Х., Неугомонов С. С. Расчет параметров отбойки трещиноватых руд скважинными зарядами при системах разработки с твердеющей закладкой // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2009. № 1. С. 22–24.
7. Шер Е. Н. Форма и размеры радиальных трещин, образующихся при взрыве двух сближенных скважинных зарядов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2016. № 3. С. 250–255.
8. Сенук В. М. Импульс взрыва и условия более полного использования его на дробление массива крепких пород при взрывной отбойке // ФТПРПИ. 1979. № 1. С. 28–34.
9. Кутузов Б. Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом. М.: МГТУ, 2009. 471 с.
10. Ерофеев И. Е. Повышение эффективности буровзрывных работ на рудниках. М.: Недра, 1988. 271 с.
11. Горинов С. А., Смирнов А. А. Эффективные методы массовой отбойки трещиноватых руд на шахтах // ГИАБ. 2012. № 3. С. 323–329.
12. Черниговский А. А. Метод плоских систем зарядов в горном деле и строительстве. М.: Недра, 1971. 242 с.
13. Физика взрыва / Ф. А. Баум [и др.]. М.: Наука, 1975. 704 с.
14. Горинов С. А., Смирнов А. А. Действие взрыва плоской системы зарядов ВВ при отбойке горного массива // ГИАБ. 2001. № 4. С. 42–50.
15. Горинов С. А. Эффективность применения плоских систем зарядов для отбойки сильнотрещиноватых руд в подземных условиях // Изв. вузов. Горный журнал. 1985. № 7. С. 68–73.
16. Жариков И. Ф. Энергосберегающие технологии ведения взрывных работ на разрезах // Взрывное дело. 1998. № 91/48. С. 191–195.
17. Берсенева Г. П. Управление качеством взрывного дробления горных пород на нерудных карьерах: дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1989. 158 с.
18. Кутузов Б. Н., Безматерных В. А., Берсенева Г. П. Анализ дробящего действия зарядов ВВ с пористым промежутком // Изв. вузов. Горный журнал. 1988. № 1. С. 53–58.
19. Шевкун Е. Б., Лещинский А. В. Рассредоточение скважинных зарядов пенополистиролом // ГИАБ. 2006. № 5. С. 116–123.
20. Ломоносов Г. Г. Производственные процессы подземной разработки рудных месторождений. М.: Горная книга, 2013. 517 с.
21. Лещинский А. В., Шевкун Е. Б. Рассредоточение скважинных зарядов. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2009. 154 с.
22. Гришин А. Н., Матренин В. А., Мучник С. В. Способ формирования рассредоточенных скважинных зарядов // Горный журнал. 2007. № 4. С. 55–57.
23. Барановский К. В. Влияние горно-геологических факторов на эффективность подземной отработки наклонных залежей средней мощности // ГИАБ. 2011. № S11. С. 288–293.
24. Марченко Л. Н. Исследование процессов образования и развития трещин в твердых средах в зависимости от конструкции заряда // Взрывное дело. 1964. № 54/11. С. 102–113.
25. Барон Л. И. Кусковатость и методы ее измерения. М.: ИГД АН СССР, 1960. 124 с.
26. Рьжов П. А. Математическая статистика в горном деле. М.: Высш. школа, 1973. 287 с.
27. Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Рожков А. А. Физическое моделирование взрывной отбойки высокоценного кварца // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2017. Т. 15. № 1. С. 4–9. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9
28. Соколов И. В., Смирнов А. А., Рожков А. А. Обоснование оптимальных параметров буровзрывных работ при отбойке кварца // ГИАБ. 2016. № 7. С. 337–350.

Поступила в редакцию 10 августа 2017 года

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF QUARTZ PRODUCTION BY MEAN OF USING TWO-DIMENSIONAL SYSTEM OF DISTRIBUTED CHARGES

Sokolov I. V., Smirnov A. A., Rozhkov A. A. – The Institute of Mining, the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: geotech@igduran.ru

The article introduces the result of complex investigations of drilling and blasting operations under the production of high-priced granular quartz with underground mining method in conditions of Kyshtymsky deposit. Theoretical survey of

technology and parameters of blasting breakage has been fulfilled, aimed to solve the problem of quartz overgrinding. It has been stated that it is possible to reduce the output of fine fractions by means of the effect of interaction of simultaneously blasted deep-hole charges in a fan, whereas their interaction should be considered as a two-dimensional system of charges. The main criterion of action in a two-dimensional system of charges situated in a shape of a fan, is introduced, the criterion defines the range of geometric parameters of charges arrangement in a massif. The article suggests and tests the construction of charges, dispersed with air gaps without inert aggregate. In natural conditions of underground mine experimental blasts have been carried out, and the results have been obtained on the suggested technology of breakage with various design and energy parameters.

Key words: quartz deposit; drilling and blasting operations; overgrinding; two-dimensional system of charges; dispersion.

REFERENCES

1. Sokolov I. V., Kornilkov S. V., Sashurin A. D., Kuz'min V. G., Shemiakin V. S. [Regarding the development of scientific-technological reserve for the introduction of complex geotechnology of production and processing of high-priced quartz]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2014, no. 12, pp. 44–48. (In Russ.)
2. *Mineralurgiya zil'nogo kvartsa. Pod red. V. G. Kuz'mina, B. N. Kravitsa* [Mineralurgy of gangue quartz. Edited by V. G. Kuz'min, B. N. Kravets]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 294 p.
3. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Iu. G., Baranovskii K. V., Rozhkov A. A. [Resource saving technology of underground exploitation of high-priced quartz deposit]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Physical and Technical Problems of Mining*, 2015, no. 6, pp. 133–145. (In Russ.)
4. Sokolov I. V., Antipin Iu. G., Baranovskii K. V. [Developing the technology of experimental-industrial development of transitional zone of Kyshtymsky quartz deposit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2014, no. 6, pp. 183–189. (In Russ.)
5. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Iu. G., Baranovskii K. V., Rozhkov A. A. [The selection of optimum alternative of high-prices quartz deposit exploitation system on the basis of modeling]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Physical and Technical Problems of Mining*, 2016, no. 6, pp. 124–133. (In Russ.)
6. Kalmykov V. N., Pergament V. Kh., Neugomonov S. S. [The calculation of breakage parameters of jointed ore with blast-hole charges under the systems of development with consolidating stowing]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2009, no. 1, pp. 22–24. (In Russ.)
7. Sher E. N. [Shape and size of radial fractures, generating during the blast of the two contiguous down-hole charges]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk – Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences*, 2016, no. 3, pp. 250–255. (In Russ.)
8. Senuk V. M. [The impulse of a blast and the conditions of its more complete utilization to crush the massif of hard rock under blasting breakage]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Physical and Technical Problems of Mining*, 1979, no. 1, pp. 28–34. (In Russ.)
9. Kutuzov B. N. *Metody vedeniia vzryvnykh rabot. Ch. 1. Razrushenie gornykh porod vzryvom* [Methods of conducting blasting operations. Part 1. Rock breaking with a blast]. Moscow, MSMU Publ., 2009. 471 p.
10. Erofeev I. E. *Povyshenie effektivnosti burovzryvnykh rabot na rudnikakh* [Improving the efficiency of drilling and blasting operations in mines]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 271 p.
11. Gorinov S. A., Smirnov A. A. [Efficient methods of jointed ore mass breaking in shafts]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2012, no. 3, pp. 323–329. (In Russ.)
12. Chernigovskii A. A. *Metod ploskikh sistem zariadov v gornom dele i stroitel'stve* [The method of the two-dimensional systems of charges in mining industry and construction]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 242 p.
13. Baum F. A., and others. *Fizika vzryva* [Physics of a blast]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 704 p.
14. Gorinov S. A., Smirnov A. A. [Action of a blast in the two-dimensional system of blasts under the rock massif breakage]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2001, no. 4, pp. 42–50. (In Russ.)
15. Gorinov S. A. [Efficient use of the two-dimensional systems of charges to break the intensely jointed ore in underground conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 1985, no. 7, pp. 68–73. (In Russ.)
16. Zharikov I. F. [Energy saving technologies of blasting operations at open pits]. *Vzryvnoe delo – Explosion Technology*, 1998, no. 91/48, pp. 191–195. (In Russ.)
17. Bersenev G. P. *Upravlenie kachestvom vzryvnogo drobleniia gornykh porod na nerudnykh kar'erakh: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Controlling the quality of blasting crushing of rock at nonmetallic open pits. Cand. eng. sci. diss.]. Sverdlovsk, 1989. 158 p.
18. Kutuzov B. N., Bezmaternykh V. A., Bersenev G. P. [The analysis of crushing effect of explosive charges with porous interval]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 1988, no. 1, pp. 53–58. (In Russ.)
19. Shevkun E. B., Leshchinskii A. V. [Dispersion of down-hole charges with polystyrene foam]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2006, no. 5, pp. 116–123. (In Russ.)
20. Lomonosov G. G. *Proizvodstvennye protsessy podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii* [Workflows of underground development of ore deposits]. Moscow, Gornaia kniga Publ., 2013. 517 p.
21. Leshchinskii A. V., Shevkun E. B. *Rassredotochenie skvazhinnykh zariadov* [Dispersion of down-hole charges]. Khabarovsk, PNU Publ., 2009. 154 p.

22. Grishin A. N., Matrenin V. A., Muchnik S. V. [Method of forming dispersed down-hole charges]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2007, no. 4, pp. 55–57. (In Russ.)
23. Baranovskii K. V. [The influence of mining-geological factors on the efficiency of underground development of inclined medium deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2011, no. S11, pp. 288–293. (In Russ.)
24. Marchenko L. N. [The study of the processes of generation and development of fractures in solid medium depending on the charge construction]. *Vzryvnoe delo – Explosion Technology*, 1964, no. 54/11, pp. 102–113. (In Russ.)
25. Baron L. I. *Kuskovatost' i metody ee izmereniia* [Granulometric composition and the methods of its measurement]. Moscow, IM AS USSR Publ., 1960. 124 p.
26. Ryzhov P. A. *Matematicheskaiia statistika v gornom dele* [Mathematical statistics in mining]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 1973. 287 p.
27. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Iu. G., Rozhkov A. A. [Physical modeling of blasting breakage of high-priced quartz]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 4–9. (In Russ.)
28. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Rozhkov A. A. [The substantiation of optimum parameters of drilling and blasting operations under quartz breakage]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2016, no. 7, pp. 337–350. (In Russ.)
-