

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.235

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОЙ ОТБОЙКИ ВЫСОКОЦЕННОГО КВАРЦА

Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипов Ю.Г., Рожков А.А.

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): существующая технология взрывной отбойки гранулированного кварца при подземной разработке Кыштымского месторождения характеризуется значительным выходом фракции –20 мм (до 20%), которая в дальнейшем не используется и теряется. Учитывая ограниченность запасов и уникальность месторождения – совершенствование технологии, изыскание и обоснование параметров буровзрывных работ (БВР) представляется актуальной научно-технической задачей. **Цель** данного этапа исследований – выявление характера разрушения массива при взрывании группы удлиненных взаимодействующих зарядов в зависимости от коэффициента их сближения. **Используемые методы:** физическое моделирование с соблюдением динамического, кинематического и геометрического подобия. **Результат:** получена качественная картина разрушения модели группами удлиненных взаимодействующих зарядов при различных параметрах их расположения. Установлено, что при одновременном взрывании всех зарядов они действуют как плоская система зарядов (ПСЗ), а в ближней зоне взрыва практически не происходит переизмельчения. **Практическая значимость:** полученные результаты учтены при проектировании технологии ведения буровзрывных работ на опытно-промышленном участке Кыштымского подземного рудника.

Ключевые слова: месторождение кварца, буровзрывные работы, гранулированные ВВ, переизмельчение, физическое моделирование, плоская система зарядов.

*Исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (的独特性
идентификатор проекта RFMEF160714X0026).*

Актуальность и цель исследований

Существующая технология взрывной отбойки гранулированного кварца при подземной разработке Кыштымского месторождения характеризуется значительным выходом фракции –20 мм (20%), которая в дальнейшем не используется и фактически теряется [1–3]. Учитывая ограниченность запасов и уникальность месторождения – совершенствование технологии, изыскание и обоснование параметров буровзрывных работ представляется актуальной научно-технической задачей [4–8]. Цель данного этапа исследований – выявление характера разрушения массива при различных способах взрывания группы удлиненных взаимодействующих зарядов в зависимости от коэффициента их сближения путем физического моделирования [9–11]. В частности, наиболее интересен характер разрушения в ближней

зоне взрыва. Обусловлено это предположением о негативном влиянии взрывания одиночных зарядов на выход мелких фракций при отбойке кварца [12–16]. Ставилась задача получить качественную картину разрушения без количественных зависимостей.

Методика моделирования

Опытные взрывы проводились в подземной выработке Кыштымского рудника на специальной выровненной площадке. Всего было взорвано 46 песчано-цементных образцов с размерами $400 \times 300 \times 200$ мм при различных вариантах расположения минишпуров. Для полноты и максимальной информативности результатов коэффициент сближения зарядов принимался в широком диапазоне – 0,7–4. Минишпуры заряжались одинаковыми отрезками детонирующего шнура (ДШ). Блоки, для предотвращения разброса материала, со всех сторон и сверху засыпались песком и накрывались досками (рис 1).

© Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипов Ю.Г., Рожков А.А., 2017



Рис. 1. Подготовленные к взрыву блоки

В опытах с короткозамедленным взрыванием эффект замедления достигался за счет увеличения длины одного из отрезков ДШ на несколько метров относительно остальных зарядов блока. Ширина и высота отбиваемого слоя были значительно больше его толщины, что характерно для отбойки руды веерами скважин в подземных рудниках. Принципиальная схема расположения минишпурков в блоках приведена на **рис. 2**.

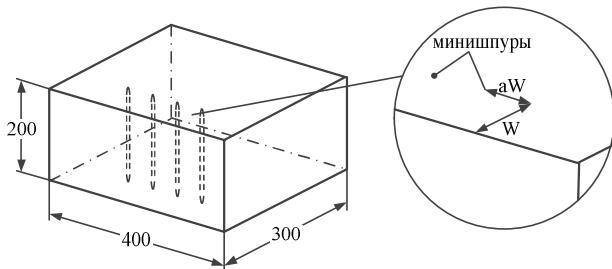


Рис. 2. Принципиальная схема расположения минишпурков: W – ЛНС (линия наименьшего сопротивления); а – коэффициент сближения

Для соблюдения физического подобия в качестве материалов для изготовления моделей разрушающего массива использовались схожие с натурой по физическим свойствам [17], а именно по коэффициенту Пуассона ($\nu=0,20-0,25$) и плотности ($\rho=2-2,5 \text{ г/м}^3$). Геометрическое подобие конструктивных параметров минишпурков и их расположения в разрушающем массиве соблюдалось в масштабе 1:10.

С учетом критического диаметра ВВ, используемого для разрушения моделей (4–5 мм), принят ТЭН, который при плотности $\rho_{\text{ВВ}}=0,95 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ и скорости детонации $D=6000 \text{ м/с}$ имеет теплоту взрыва 5,86 МДж. Промышленным ВВ принят граммонит 21ТМ3, имеющий среднее значение теплоты взрыва 4,29 МДж при плотности $1,15 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Для соблюдения динамического и кинематического критерия подобия радиус модельного заряда, эквивалентный по энергии взрыва заряду Граммонаита 21ТМ3, определяется по формуле [18]

$$(R_{\text{o3}}^*)_{\text{M}} = (R_{\text{o3}})_{\text{M}} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_{\text{ВВ}})_{\text{M}} \cdot Q_{\text{M}}}{(\rho_{\text{ВВ}})_{\text{H}} \cdot Q_{\text{H}}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,95 \cdot 5,86}{1,15 \cdot 4,29}} \approx 2,$$

где $(R_{\text{o3}})_{\text{M}}$ – фактический радиус модельного заряда, мм; Q_{M} и Q_{H} – теплота взрывчатого превращения соответственно модельного и натурального ВВ, МДж; $(\rho_{\text{ВВ}})_{\text{M}}$ и $(\rho_{\text{ВВ}})_{\text{H}}$ – плотности модельного и промышленного ВВ, г/см³.

Таким образом, при проведении экспериментов в качестве заряда ТЭНа принят ДШ (ДШЭ-12, диаметр $5 \pm 0,5$ мм с оболочкой).

Использование детонирующего шнура ДШЭ-12 (ДШ) обеспечило удобство обращения, надежность инициирования и постоянство заряда по его длине.

Результаты моделирования

При одновременном взрывании взаимодействующих зарядов во всех вариантах расположения скважин была получена одинаковая картина разрушения – пробой массива по плоскости расположения скважин, образование общей полости взрыва и общей воронки отрыва на ЛНС (**рис. 3**) [19].

Во всех опытах на плоскости отрыва четко видны следы минишпурков, диаметр которых несколько увеличен, но зон мелкого дробления не наблюдается.

При короткозамедленном взрывании центрального заряда по отношению к двум крайним (330–500 мкс) в целом получена аналогичная картина разрушения блоков, т.е. происходит раскол массива по плоскости расположения минишпурков. Около зарядов наблюдается небольшая зона мелкого дробления и радиальных трещин вне зависимости от коэффициента сближения, а также, в отдельных случаях, собственная воронка взрыва центрально-го заряда (**рис. 4**). Это позволяет сделать вывод, что пробой массива по плоскости зарядов происходит не только при мгновенном одновременном взрывании зарядов, но и при взрывании их с некоторым замедлением.

Для дополнения картины разрушения песчано-цементных блоков взрывом одиночного удлиненного заряда на свободную поверхность выполнена следующая серия опытов с переменной ЛНС (50, 70, 90, 110 мм). Результаты показали закономерное ухудшение дробления в объеме воронки взрыва с увеличением ЛНС. Угол раскрытия воронки при увеличении ЛНС уменьшался от 150° до 90° (**рис. 5**).

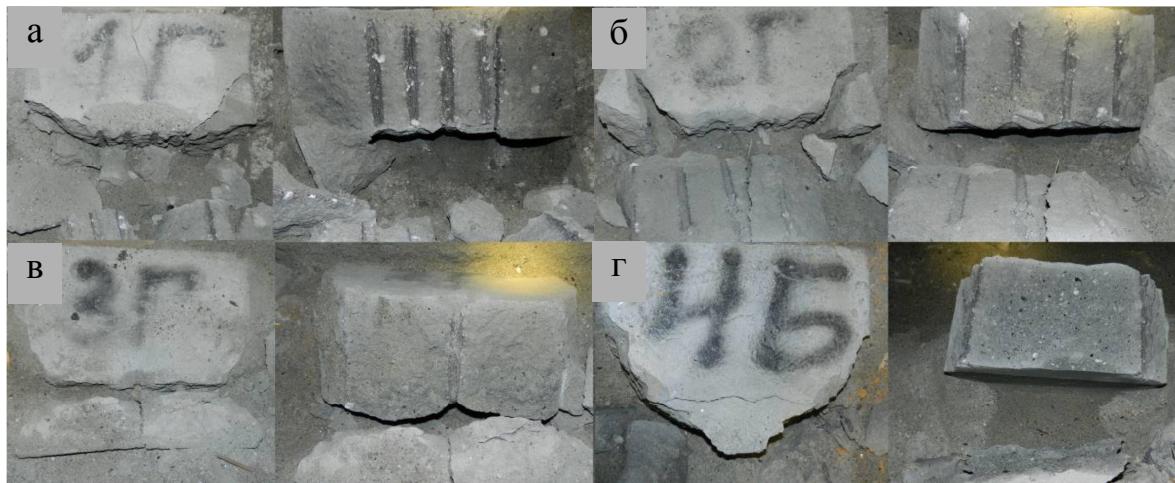


Рис. 3. Картина разрушения при взрыве: а – 4-х зарядов с коэффициентом сближения 0,7; б – 4-х зарядов с коэффициентом сближения 1; в – 3-х зарядов с коэффициентом сближения 2; г – 2-х зарядов с коэффициентом сближения 4



Рис. 4. Картина разрушения при взрыве 3-х зарядов с замедлением на центральный заряд:
а – с коэффициентом сближения 1; б – с коэффициентом сближения 2

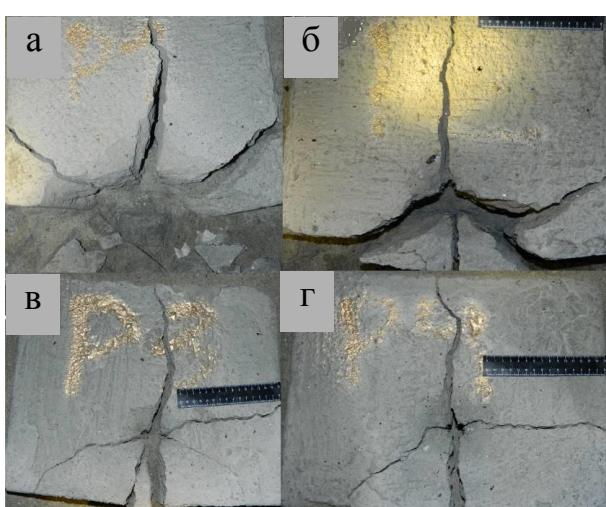


Рис. 5. Картина разрушения при взрыве одного заряда на свободную поверхность при ЛНС:
а – 50 мм; б – 70 мм; в – 90 мм; г – 110 мм

При максимальной ЛНС 110 мм разрушение блока на свободную поверхность ограничилось двумя трещинами: одной радиальной, второй параллельной свободной поверхности.

По результатам данной серии можно говорить, что предельная величина ЛНС составляет примерно 100 мм, или 20–22 диаметров заряда.

Для оценки воздействия взрыва взаимодействующих зарядов непосредственно на кварц и проверки влияния на результаты экспериментов свойств отличного от остальных разрушаемого материала был проведен опытный взрыв в блоке из гранулированного кварца. Подготовлены и одновременно взорваны три заряда с коэффициентом сближения 1,0 (рис. 6).

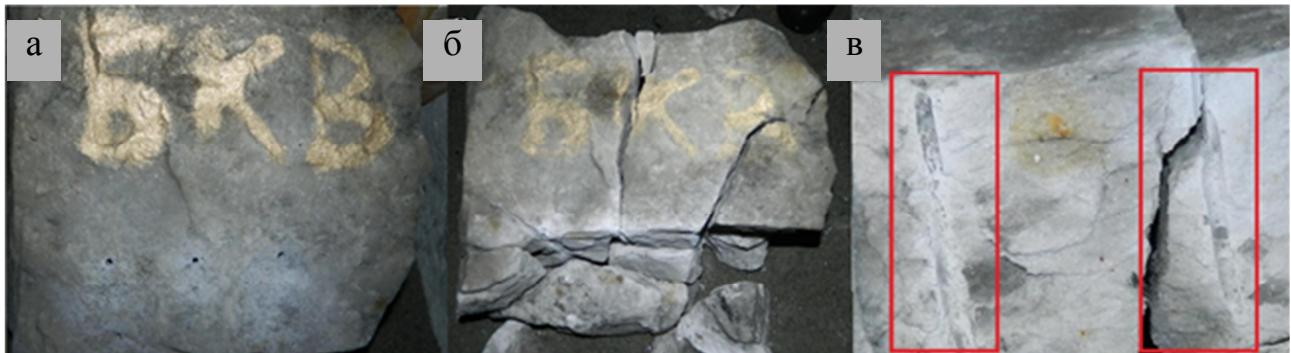


Рис. 6. Взрывание кварца: а – негабаритный кусок гранулированного кварца с подготовленными мини-шпурами; б – картина разрушения при взрыве 3-х зарядов с коэффициентом сближения 1,0; в – полости минишпуротов после взрыва

Картина **рис. 6, б** полностью идентична характеру разрушения песчано-цементных блоков. Показательным является тот факт, что по плоскости своего расположения четко просматриваются полости минишпуротов, вокруг которых полностью отсутствуют зоны мелкого дробления (**рис. 6, в**). Можно сделать вывод, что для эффективной отбойки кварца необходимо лишь отделить слой от массива, а его дальнейшее разрушение будет происходить при отбросе и падении слоя на естественные отдельности.

Особенность гранулированного кварца состоит в том, что при определенных уровнях ударной или взрывной нагрузки он может лавинообразно превращаться в совокупность мелких гранул размером 1–5 мм, минуя состояние разрушенности, когда преобладают фракции размером 10–40 см [4, 20]. Наш опыт показал, что при взрыве взаимодействующих зарядов вышеописанный эффект не наблюдается.

Полученные результаты хорошо корреспондируют с результатами, полученными в работах [21, 22], где схожие эксперименты проводились на моделях из мрамора и органического стекла. Количество материалов, использованных для изготовления моделей и их различия в физических свойствах, дает основание считать полученную картину разрушения характерной для любого твердого массива. Обобщение всего вышесказанного позволяет сделать вывод, что систему удлиненных зарядов, расположенных в одной плоскости, взрываемых одновременно и взаимодействующих между собой, следует считать плоской системой зарядов, т.е. аналогичной по картине разрушения сплошному заряду плоской формы [23].

Заключение

Эксперименты показали, что при одновременном взрыве удлиненных зарядов, расположенных

в одной плоскости, происходит опережающий раскол массива по этой плоскости в диапазоне изменения коэффициента сближения зарядов от 0,7 до 4. При расположении зарядов в виде веера скважин коэффициент сближения увеличивается от устьев скважин к их концам и практически не превышает 4. Следовательно, при одновременном взрывании зарядов веер скважин представляет собой плоскую систему зарядов.

Основываясь на результатах физического моделирования, при взрывной отбойке гранулированного кварца рекомендуется применять веерные удлиненные заряды [24], взрываемые одновременно. Необходимо обеспечить надежный отрыв отбиваемого слоя и при этом не допустить лавинообразного превращения кварца в совокупность мелких фракций, что достигается оптимизацией удельного расхода ВВ. Поскольку кварцевый массив является сильнонтрещиноватым, отбиваемый слой будет разрушаться по естественным трещинам [25] при падении на днище камеры [26].

В дальнейших исследованиях одной из главных задач является определение параметров сетки скважин, их диаметра и конструкции заряда для достижения оптимального удельного расхода ВВ, при котором обеспечится снижение выхода фракции –20 мм до 12–14% и выход негабарита не более 10%.

При одновременном взрыве всех зарядов в веере сейсмическое действие взрыва на целики и близлежащие выработки может превысить допустимый предел. В этом случае возможно использование внутривеерного замедления, при котором в каждой ступени замедления одновременно будет срабатывать не менее 3–4 зарядов. Каждая ступень в отдельности будет действовать как плоский заряд, обеспечивая требуемое качество дробления кварцевого сырья.

Список литературы

1. О формировании научно-технологического задела для внедрения комплексной геотехнологии добычи и переработки высокоценного кварца / И.В. Соколов, С.В. Корнилов, А.Д. Сашурин и др. // Горный журнал. 2014. №12. С. 44–48.
2. Оценка возможности рентгенорадиометрического обогащения кварцевого сырья Кыштымского месторождения / Шемякин В.С., Сколов С.В., Кузьмин В.Г., Соколов И.В. // Горный журнал. 2015. №11. С. 66–69.
3. Ресурсосберегающая технология подземной разработки месторождения высокоценного кварца / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипов и др. // ФТПРПИ. 2015. №6. С. 133–145.
4. Минералургия жильного кварца / под ред. В.Г. Кузьмина, Б.Н. Кравца. М.: Недра, 1990. 294 с.
5. Furtney S. J. K., Sellers E., Onederra I. Simple models for the complex process of rock blasting. Rock Fragmentation by Blasting: Fragblast 10 / Edited by Pradeep K. Singh, Amalendu Sinha. Leiden, Netherlands: CRC Press, 2013. P. 275–282.
6. Akande J. M., Lawal A. I. Optimization of Blasting Parameters Using Regression Models in Ratcon and NSCE Granite Quarries, Ibadan, Oyo State, Nigeria // Geomaterials. 2013. Vol. 3. No. 1. P. 28–37.
7. Burkle W. S. Optimum drilling and blasting procedures // Pit & Quarry. 1985. Vol. 77. P. 30–34.
8. Влияние показателей извлечения на эффективность технологии подземной разработки рудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипов и др. // Изв. вузов. Горный журнал. 2012. №3. С.4–11.
9. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. М.: Недра, 1990. 231 с.
10. Калмыков В.Н., Мещеряков Э.Ю., Волков П.В. Обоснование параметров геотехнологического модуля «очистные работы» при освоении запасов в приkontурных зонах карьеров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С. 5–8.
11. 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 им. Г.И. Носова. 2009. № 1. С. 22–24.
12. Физика взрыва / Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Чельышев В.П., Шехтер Б.И. М.: Наука, 1975. 704 с.
13. Руппенейт К.В. Деформируемость трещиноватых массивов горных пород. М.: Недра, 1975. 223 с.
14. Тюлин В.Н., Лизункин М.В., Лизункин В.М. Определение размера зоны разрушения напряженного трещиноватого горного массива при одновременном взрывании нескольких параллельно сближенных зарядов ВВ // ГИАБ. 2015. №12. С. 46–51.
15. Белин В.А., Крюков Г.М. Итоги развития теории разрушения горных пород взрывом // Взрывное дело. 2011. №105/62. С. 3–17.
16. Воронов Е.Т., Бондарь И.А. Кристаллосберегающие технологии подземной разработки месторождений горного хрустали // Горный журнал. 2011. №11. С. 23–25.
17. Любимов Н.И., Носенко Л.И. Справочник по физико-механическим параметрам горных пород рудных районов. М.: Недра, 1978. 288 с.
18. Шалаев М.С., Парамонов Г.П. К вопросу повышения эффективности экранирующей щели за счет выбора рациональной конструкции контурного заряда // Взрывное дело. 2010. №103/60. С. 190–199.
19. Соколов И.В., Смирнов А.А., Рожков А.А. Обоснование оптимальных параметров буровзрывных работ при отбойке кварца // ГИАБ. 2016. № 7. С. 337–350.
20. Кутузов Б.Н., Безматерных В.А., Берсенев Г.П. Анализ дробящего действия зарядов ВВ с пористым промежутком // Изв. вузов. Горный журнал. 1988. №1. С. 53–58.
21. Горинов С.А. Эффективность применения плоских систем зарядов для отбойки сильнотрещиноватых руд в подземных условиях // Изв. вузов. Горный журнал. 1985. №7. С. 68–73.
22. Смирнов А.А. Исследование и выбор рациональных параметров скважинной отбойки крепких руд: дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1973. 172 с.
23. Горинов С.А., Смирнов А.А. Действие взрыва плоской системы зарядов ВВ при отбойке горного массива // ГИАБ. 2001. № 4. С. 42–50.
24. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Взрывные работы в горном деле и промышленности. М.: Горная книга; МГГУ, 2008. 512 с.
25. Барон Л.И., Личели Г.П. Трещиноватость горных пород при взрывной отбойке. М.: Недра, 1966. 136 с.
26. Соколов И.В., Барановский К.В. Выбор эффективной технологии подземной разработки месторождения кварца // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №2. С. 10–17.

Материал поступил в редакцию 23.03.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9

PHYSICAL MODELLING OF BLASTING IN HIGH-GRADE QUARTZ MINING**Igor V. Sokolov – D.Sc. (Eng.)**Head of Underground Mining Laboratory of the Institute of Mining, UB RAS, Yekaterinburg, Russia. Phone: +7(343)350-71-28. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7841-5319>**Alexey A. Smirnov – Ph.D. (Eng.)**Senior Research Fellow at the Underground Mining Laboratory of the Institute of Mining, UB RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8949-1525>**Yuri G. Antipin – Ph.D. (Eng.)**Senior Research Fellow at the Underground Mining Laboratory of the Institute of Mining, UB RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3564-0310>**Artem A. Rozhkov – Postgraduate Student**Junior Research Fellow at the Underground Mining Laboratory of the Institute of Mining, UB RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3007-1099>**Abstract****Problem Statement (Relevance):** The blasting technology applied for granular quartz at the Kyshtym under-

ground mine produces a significant yield of -20 mm rock (up to 20%), which cannot be processed thus constituting waste. Optimization of the blasting technology and study

of the blasting parameters appear to present an important task considering the limited resources and the uniqueness of the deposit. **Objectives:** The objective of the current stage of the research is to identify the fragmentation pattern resulting from blasting a group of interacting column charges as related to the burden-to-spacing ratio. **Methods Applied:** Physical modeling was applied while securing dynamic, kinematic and geometric similarity. **Findings:** Quality results were obtained that show how the model is fractured when blasted with interacting column charges at different arrangements. It was found that when detonated at the same time interacting column charges act as flat charge and that there occurs almost no overgrinding in the nearest blast zone. **Practical Relevance:** The above modelling results are taken into account when designing the drilling and blasting technology for the test field of the Kyshtym underground mine.

Keywords: Quartz deposit, blasting and drilling, granulated explosives, overgrinding, physical modeling, flat charge.

This research was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project ID: RFMEF160714X0026).

References

1. Sokolov I.V., Kornilkov S.V., Sashurin A.D. et al. On the provision of scientific basis for the introduction of a comprehensive mining and processing technology for high-grade quartz. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2014, no. 12, pp. 44–48. (In Russ.)
2. Shemyakin V.S., Skopov S.V., Kuzmin V.G., Sokolov I.V. Assessing the feasibility of using an X-ray recovery circuit for quartz from the Kyshtym mine. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2015, no. 11, pp. 66–69. (In Russ.)
3. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranowski K.V., Rozhkov A.A. A resource saving high-grade quartz underground mining technology. FTPRPI. 2015, no. 6, pp. 133–145. (In Russ.)
4. Mineralurgy of vein quartz. Ed. by V.G. Kuzmin, B.N. Kravc. Moscow: Nedra, 1990. 294 p. (In Russ.)
5. Furtney S. J. K., Sellers E., Onederra I. Simple models for the complex process of rock blasting. Rock Fragmentation by Blasting: Fragblast 10. Edited by Pradeep K. Singh, Amalendu Sinha. Leiden, Netherlands: CRC Press, 2013, pp. 275–282.
6. Akande J. M., Lawal A. I. Optimization of Blasting Parameters Using Regression Models in Ratcon and NSCE Granite Quarries, Ibadan, Oyo State, Nigeria. Geomaterials. 2013, vol. 3, no. 1, pp. 28–37.
7. Burkle W. S. Optimum drilling and blasting procedures. Pit & Quarry. 1985, vol. 77, pp. 30–34.
8. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Y.G., Sokolov R.I. The impact of recovery on the efficiency of underground ore mining technology. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian Universities. Mining Journal]. 2012, no. 3, pp. 4–11. (In Russ.)
9. Borovikov V.A., Vanyagin I.F. Simulation of explosion in rock fragmentation by blasting. Moscow: Nedra, 1990. 231 p. (In Russ.)
10. Kalmykov V.N., Meshcheryakov E.Yu., Volkov P.V. Justification of stoping parameters in near-field mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 4, pp. 5–8. (In Russ.)
11. Kalmykov V.N., Pergament V.Kh., Neugomonov S.S. Calculating the breakage parameters of fractured ores broken by deep-hole charges in consolidated stowing systems. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 1, pp. 22–24. (In Russ.)
12. Baum F.A., Orlenko L.P., Stanyukovich K.P., Chelishev V.P., Schechter B.I. The physics of explosions. Moscow: Nauka, 1975, 704 p. (In Russ.)
13. Ruppeneyt K.V. The deformability of fractured rock massifs. Moscow: Nedra, 1975, pp. 121–191. (In Russ.)
14. Tyupin V.N., Lizunkin M.V., Lizunkin V.M. Determining the size of the fragmentation zone in stress-affected fractured rock when detonating several parallel charges. GIAB, 2015, no. 12, pp. 46–51. (In Russ.)
15. Belin V.A., Kryukov G.M. A summary of the advanced theory of rock fragmentation by blasting. *Vzryvnoe delo* [Blasting]. 2011, no. 105/62, pp. 3–17. (In Russ.)
16. Voronov E.T., Bondar I.A. Crystal-saving technology in quartz underground mining. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2011, no. 11, pp. 23–25. (In Russ.)
17. Lyubimov N.I., Nosenko L.I. Handbook on physical and mechanical parameters of rock found in ore districts. Moscow, Nedra, 1988. (In Russ.)
18. Shalaev M.S., Paramonov G.P. On enhancing the efficiency of screenout fracturing by optimizing the contour-hole charge design. *Vzryvnoe delo* [Blasting]. 2010, no. 103/60, pp. 190–199. (In Russ.)
19. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A. Justification of optimum drilling and blasting parameters in quartz mining. GIAB, 2016, no. 7, pp. 337–350. (In Russ.)
20. Kutuzov B.N., Bezmaternykh V.A., Bersenev G.P. Studying the crushing action of porous explosives. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian Universities. Mining Journal]. 1988, no. 1, pp. 53–58. (In Russ.)
21. Gorinov S.A. The effectiveness of flat charges in breaking heavily fissured ores in underground conditions. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian Universities. Mining Journal]. 1985, no. 7, pp. 68–73. (In Russ.)
22. Smirnov A.A. Study and selection of optimum longhole stoping parameters for hard ores: Ph.D. dissertation. Sverdlovsk: IM MCM USSR, 1973, 172 p. (In Russ.)
23. Gorinov S.A., Smirnov A.A. The explosive action of flat charge in rock blasting. GIAB, 2001, no. 4, pp. 42–50. (In Russ.)
24. Kutuzov B.N. Blasting methods. Blasting operations in mining and industry. Moscow: Mining Book; Moscow State Mining University, 2008, 512 p.
25. Baron L.I., Lichely G.P. Rock fracture during blasting. Moscow: Nedra, 1966, 136 p. (In Russ.)
26. Sokolov I.V., Baranovsky K.V. Choosing an efficient technique for underground mining of quartz. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 2, pp. 10–17. (In Russ.)

Received 23/03/16

Образец для цитирования

Физическое моделирование взрывной отбойки высокоценного кварца / Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Рожков А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 4–9. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9

For citation

Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A. Physical modelling of blasting in high-grade quartz mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 4–9. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9