УДК 622.235

И.В. Соколов, А.А. Смирнов, А.А. Рожков

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ ОТБОЙКЕ КВАРЦА*

Кыштымское месторождение высокоценного гранулированного кварца является практически единственным источником данного сырья для высокотехнологичных отраслей экономики России. В настоящее время месторождение отрабатывается подземным способом с применением взрывной отбойки. Применяемая технология ведения буровзрывных работ (БВР) с использованием патронированных взрывчатых веществ (ВВ), ручной зарядкой и глиняной забойкой трудоемка и не обеспечивает требуемых показателей по выходу негабарита и переизмельченной фракции кварца -20 мм. Следовательно, актуально совершенствование технологии и оптимизация параметров ведения БВР. Предложена технология послойной отбойки вертикальными веерами скважин с использованием механизированной зарядки гранулированными ВВ. Взрывание всех зарядов в веере производится единовременно. Как показали теоретические исследования и лабораторно-полигонные эксперименты (ЛПЭ), снижение степени переизмельчения кварца при отбойке можно добиться за счет использования эффекта взаимодействия зарядов при их одновременном взрывании в веере скважин, результатом которого является образование общей полости взрыва без зон переизмельчения около каждого заряда. Основываясь на результатах теоретических исследований и ЛПЭ, выполнено математическое моделирование взрывной отбойки и предложены параметры БВР для опытно-промышленного внедрения на экспериментальном участке Кыштымского месторождения.
Ключевые слова: месторождение кварца, буровзрывные работы, механизированная зарядка, гранулированные ВВ, переизмельчение, лабораторно-полигонный эксперимент, математическое моделирование, опытно-промышленное внедрение.

Кыштымское месторождение является единственным в России эксплуатируемым месторождением высокоценного гранулированного кварца и источником сырья для производства принципиально новых материалов (кварцевое стекло, специальная керамика, продукция двойного назначения).

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

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 337–350.
© 2016. И.В. Соколов, А.А. Смирнов, А.А. Рожков.

Рациональное использование запасов высокоценного кварца в связи с их ограниченностью крайне важно для развития инновационных отраслей российской промышленности [1–6]. Одним из источников потерь ценного сырья является некондиционная фракция кварца (-20 мм), образующаяся в результате переизмельчения руды при ее взрывной отбойке. Выход фракции в среднем составляет около 16–20%. Соответственно резко сокращается сырьевая база предприятия и срок эксплуатации уникального месторождения. Из вышесказанного следует вывод о необходимости совершенствования технологии ведения БВР при отработке Кыштымского месторождения комбинированной системой разработки [7–9].

В настоящее время отбойка кварца в камерах осуществляется послойно вертикальными веерами скважинных зарядов диаметром 105 мм. Величина линии наименьшего сопротивления (ЛНС) и расстояние между концами скважин – 2,5 м. Для снижения выхода переизмельченной фракции используются рассредоточенные заряды: патроны аммонита 6ЖВ перемежаются промежутками, заполненными глиняной забойкой.

Зарядка скважин производится вручную. Удельный расход ВВ составляет около 0,9 кг/м^3 руды в массиве. Каждый скважинный заряд взрывается с секундным замедлением на ЛНС и образованную взрывом предыдущего заряда воронку, т.е. практически отбойка осуществляется взрывами одиночных зарядов. Такой способ взрывания позволяет получить удовлетворительное качество взрыва, но достаточно трудоемок и применим только при небольшой длине скважин (до 8–10 м).

При новой проектируемой технологии отработки Кыштымского месторождения предусматривается массовая отбойка кварца вертикальными веерами скважин. Так как размеры камер в высоту и ширину увеличиваются до 20–26 м, соответственно и длина скважин в веере достигает 22–24 м. Ручная зарядка скважин при этом трудноосуществима. Вследствие этого предусматривается механизированная зарядка скважин штатным гранулированным ВВ АС-8.

Наши исследования [1] показывают, что при всех возможных параметрах расположения скважин в веере их следует рассматривать как плоскую систему зарядов, т.е. систему удлиненных зарядов, расположенных в одной плоскости, взрываемых одновременно и взаимодействующих между собой.

Действие взрыва плоской системы зарядов кардинально отличается от действия взрыва одиночного заряда: в начальный

период взрыва по плоскости расположения взаимодействующих зарядов прорастает магистральная трещина, радиальных трещин от отдельных зарядов и зоны переизмельчения породы вокруг каждого заряда не образуются. В практически возможных случаях длина пробоя между двумя взрываемыми зарядами гранулита АС-8 диаметром 65 мм находится в пределах 2,0–4,0 м, т. е. включает все возможные варианты расположения скважин при отбойке кварца.

После пробоя массива по плоскости расположения кварца газовые полости отдельных зарядов объединяются и отбиваемый слой находится под действием плоского поля напряжений сжатия. При хрупком разрушении в соответствии с теорией Кулона-Мора кварцевый массив, как и большинство горных пород, под действием напряжений сжатия, не разрушается: квазистатическим давлением газов взрыва отбиваемый слой отделяется от массива и дальнейшее дробление определяется его естественной трещиноватостью. Переизмельчения кварца в ближней зоне взрыва не происходит, выход некондиционной фракции определятся интенсивностью удара о стенки камеры, дроблением кусков при падении и соударении, и в целом зависит от величины удельного расхода ВВ на отбойку.

С целью подтверждения достоверности теоретических исследований проведена серия ЛПЭ по имитационному моделированию действия взрыва плоской системы зарядов. В качестве разрушаемого массива использовались песчано-цементные блоки. Прочность блоков не имела существенного значения и находилась в пределах 3–5 МПа. Небольшая относительная прочность позволила получить качественную картину разрушения среды со всеми необходимыми подробностями. Удлиненные заряды ВВ имитировались отрезками детонирующего шнура ДШЭ-12 (ДШ), что обеспечило удобство обращения, надежность инициирования и постоянство заряда по его длине. Инициирование соединенных вместе отрезков ДШ всех зарядов производилось от одного электродетонатора мгновенного действия, что обеспечивало одновременность подрыва всех зарядов блока.

Содержание экспериментов определялось особенностями расположения скважин в виде вертикального веера, причем толщина отбиваемого слоя существенно меньше ширины и высоты слоя. При этом особенностью такого расположения скважин является переменный по длине скважин коэффициент их сближения – соотношение расстояния между скважинами в веере и ЛНС.

При практически возможных параметрах сетки скважин диаметром 60–120 мм максимальный коэффициент сближения концов скважин принимается равным 4. Поэтому задачей экспериментов являлось изучение картины разрушения массива при взрыве взаимодействующих зарядов в диапазоне измене-

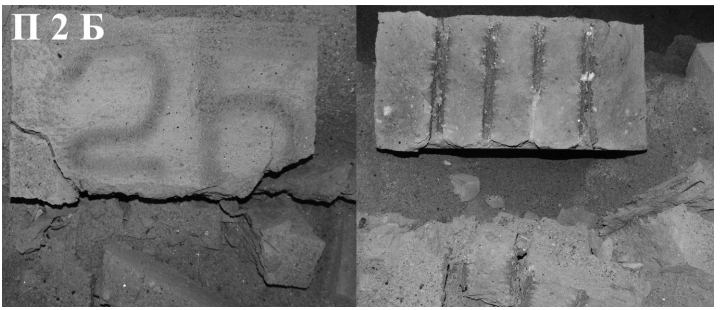

Рис. 1. Картина разрушения при взрыве 4-х зарядов с коэффициентом сближения 1,0

Рис. 2. Картина разрушения при взрыве 3-х зарядов с коэффициентом сближения 2,0

Рис. 3. Картина разрушения при взрыве 2-х зарядов с коэффициентом сближения 4,0

ния коэффициента их сближения от 0,7 до 4. При этом варьировалась и величина ЛНС. При всех вариантах расположения скважин была получена одинаковая картина разрушения: пробой массива по плоскости расположения скважин, образование общей полости взрыва и общей воронкой отрыва на ЛНС (рис. 1, 2, 3).

Интересно, что трещина между зарядами прошла и в случае наибольшего расстояния между зарядами и наибольшего коэффициента сближения 4 (рис. 3), хотя расстояние зарядов от боковой поверхности блока составляло всего 60 мм, и логично было предполагать, что заряды сработают только на эту боковую поверхность. Во всех опытах на плоскости отрыва четко видны следы минишпуров. Диаметр зарядов несколько увеличен, но зон мелкого дробления и зоны радиальных трещин около зарядов не наблюдается. В пределах совместной воронки взрыва всех зарядов более мелкое дробление среды происходит только в первом опыте при коэффициенте сближения 0,7, в остальных материал дробится на крупные прямоугольные куски.

В целом, проведенные ЛПЭ по моделированию действия взрыва группы взаимодействующих зарядов полностью подтвердили результаты теоретических исследований. При всех возможных параметрах расположения взаимодействующих зарядов на первой стадии взрыва происходит пробой массива по плоскости расположения скважин, при этом роста радиальных трещин и зон переизмельчения от отдельных зарядов не наблюдается, а характер разрушения массива определяется давлением продуктов детонации в совместной полости взрыва взаимодействующих зарядов. Степень дробления материала в пределах общей воронки взрыва определяется удельной мощностью, т.е. расходом ВВ на единицу объема воронки.

Основываясь на результатах теоретических исследований и ЛПЭ, в несколько последовательных этапов выполнено математическое моделирование отбойки кварца [10–20].

На первом этапе определены размеры зон разрушения кварцевого массива при взрыве одиночных удлиненных зарядов различных ВВ, и зоны вероятного выхода переизмельченного кварца. Установлены зависимости удельного и процентного выхода переизмельченного кварца от радиуса заряда для ВВ с различной скоростью детонации D (м/с) (рис. 4).

Графики показывают закономерное увеличение объема выхода некондиционной фракции с увеличением скорости детонации ВВ и диаметра заряда (см. рис. 4, *а*). В то же время

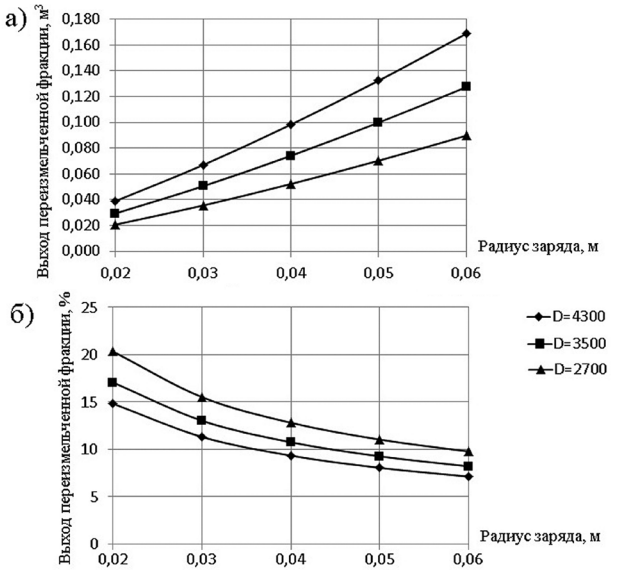

Рис. 4. Зависимость выхода переизмельченной фракции -20 мм от радиуса заряда: а) на 1 м скважины; б) на весь веер скважин

процентный выход фракции -20 мм с увеличением диаметра заряда уменьшается (см. рис. 4, *б*). Этот кажущийся парадоксальным результат имеет вполне логическое объяснение: при увеличении диаметра заряда общий объем разрушения массива растет быстрее увеличения объема зоны выхода некондиционной фракции. В целом полученные зависимости закономерны для взрыва одиночного удлиненного заряда ВВ в кварце [10].

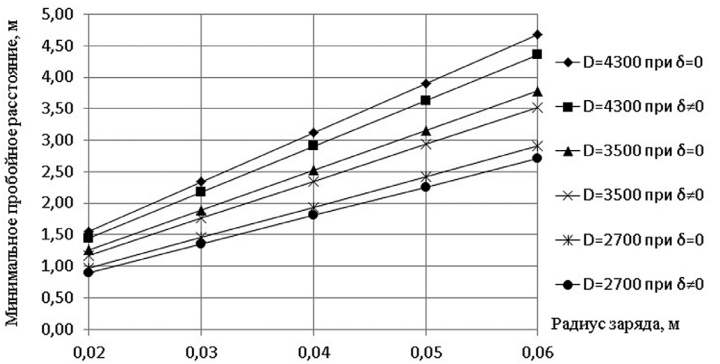

Рис. 5. Зависимость минимального пробойного расстояния между двумя зарядами от их радиуса и напряжения в массиве

На втором этапе моделирования рассчитана величина пробоя между двумя взаимодействующими зарядами ВВ в зависимости от радиуса заряда для действующих в горном массиве первоначальных напряжений, перпендикулярных их плоскости δ (МПа), и ВВ с различной скоростью детонации D (м/с) (рис. 5).

Установлено, что при отбойке кварца веерами скважин опережающий рост магистральной трещины по плоскости расположения скважин происходит при всех принятых параметрах БВР.

Дальнейшее разрушение массива определяется давлением продуктов детонации в щелевидной полости. Расчету данного давления и посвящен третий этап математического моделирования.

Начальное давление газов взрыва рассчитывается по формуле [11, 12]:

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

где D – скорость детонации ВВ, м/с; $\rho_{вв}$ – плотность ВВ, кг/м^3; i – показатель политропы газов взрыва.

Давление в общей полости взрыва веера скважинных зарядов в срединной части [13]:

$$P_{ср} = P_0[n\pi r^2 (n\pi r^2 + 2\Delta u B_{ср})^{-1}]^i, \text{ МПа} \qquad (2)$$

где n – количество скважин в веере, шт.; r – радиус зарядов, м; Δu – смещение стенки щелевидной полости, м; $B_{ср}$ – ширина срединной части веера, м.

Давление в общей полости взрыва веера скважинных зарядов ближе к забоям скважин [14]:

$$P = P_0[n\pi r^2 (n\pi r^2 + 2\Delta u B)^{-1}]^i, \text{ МПа} \qquad (3)$$

где B – ширина веера, м.

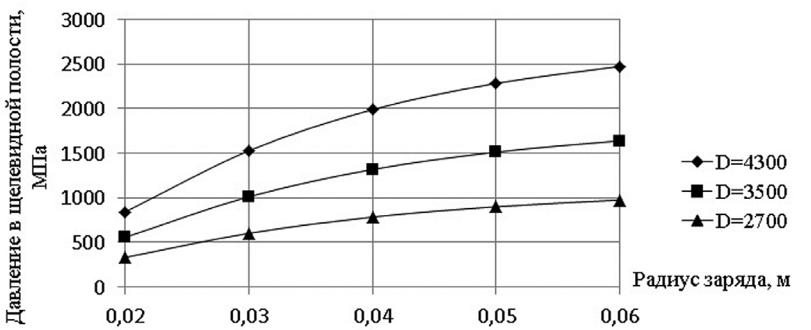

Рис. 6. Зависимость давления в щелевидной полости от радиуса заряда и скорости детонации (м/с)

Для расчета начального давления принимается, что Δu = = 1 мм. Результаты расчетов приведены на рис. 6.

Полученные общие зависимости позволяют перейти к расчету параметров БВР при экспериментальных испытаниях массовой отбойки кварца.

Одним из главных требований при отбойке кварца является полнота отрыва отбиваемого слоя от массива, что может быть реализовано только при обеспечении некоторого минимально необходимого давления в общей полости взрыва. Для расчета данного минимального давления (P_{min}) использована методика к.т.н. С.А. Горинова [14], в соответствие с которой

$$P_{min} = |\sigma_{сж}| M_{сж}[(2\pi(1-\alpha^2)\rho_{вв}W)((1-\alpha^2)\rho_{зар}BF(t))^{-1}]^{0,5}, \text{ МПа} \quad (4)$$

$$t = AB^{-1}, \quad (5)$$

$$M_{сж} = k^{-1}[1 + ((2\eta - 1)(1-\alpha) + 2\alpha(1+\alpha\eta))(2(1-\alpha+\alpha^2)\sigma_{сж})^{-1}], \quad (6)$$

где $\sigma_{сж}$ – прочность кварца на сжатие, МПа. Для кварца Кыштымского месторождения изменяется в пределах 113–178 МПа; $M_{сж}$ – коэффициент, учитывающий напряжения в точках, лежащих на проектных зонах разрушения; α – коэффициент бокового распора; $\rho_{зар}$ – плотность заряжания, кг/м^3; 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, 0,71–0,9; η – коэффициент равный $\eta = (1 + \sin\varphi)(1 - \sin\varphi)^{-1}$; φ – коэффициент внутреннего трения кварца.

Зависимость величины минимально необходимого давления в общей полости взрыва от прочностных свойств массива и параметров расположения скважин показана на рис. 7.

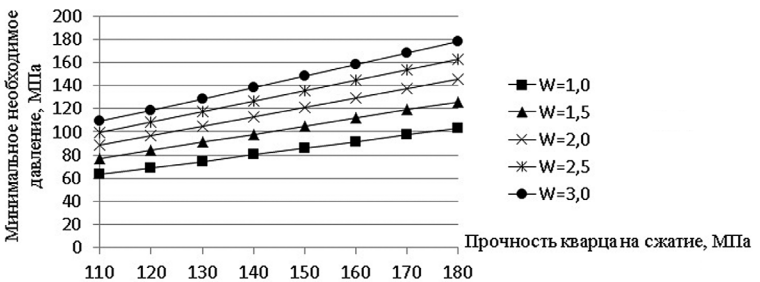

Рис. 7. Зависимость минимального необходимого давления от прочностных характеристик кварца

Особенность веерного расположения скважин состоит в том, что при постоянной ЛНС расстояния между скважинами в веере и соответственно коэффициент сближения увеличиваются от устья скважин к их забоям. Между тем давление продуктов детонации в общей полости взрыва в значительной степени определяется именно расстоянием между взаимодействующими скважинами. Поэтому начальное давление в этой полости при движении от устьев скважин к их концам закономерно уменьшается.

Для отрыва отбиваемого слоя от массива давление в полости взрыва должно превышать необходимое. Однако при этом происходит расширение общей полости с соответствующим падением давления газов взрыва. К моменту отрыва слоя это давление становится близким к атмосферному. Так как последнее на несколько порядков ниже начального давления газов в общей

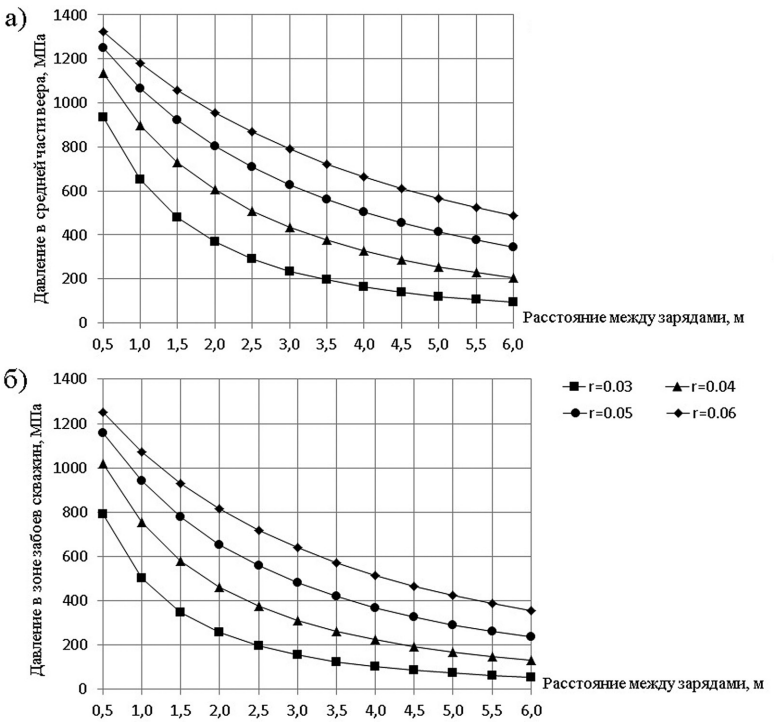

Рис. 8. Зависимость давления скважин при взрыве веерных зарядов от радиуса скважин и расстояния между ними: а) в средней части веера; б) в зоне забоев

полости взрыва, можно принять, что среднее давление в полости взрыва – равно половине величины начального давления.

При экспериментах характерной величиной является давление в средней части веера скважин, которое в нашем случае приурочено к наиболее широкому горизонтальному сечению камеры. Математическим моделированием определено среднее давление в общей полости взрыва в зависимости от радиуса скважин и расстояния между ними (рис. 8, *а*).

Однако следует иметь в виду, что определяющим полноту отрыва всего слоя является отрыв по концам скважин. Рассчитанное для зоны концов скважин давление показано на рис. 8, *б*.

При существующей практике массовой отбойки скальных горных пород крепостью по шкале проф. Протодъяконова 10–15, ЛНС и расстояние между концами скважин в веере обычно равны 20–30 диаметрам скважин. Можно утверждать, что при практически возможных размерах сетки скважин всегда обеспечивается отрыв отбиваемого слоя от массива. Между тем, в соответствии с нашими исследованиями, для уменьшения выхода переизмельченной фракции следует стремиться к уменьшению удельного расхода ВВ, то есть разрежению сетки скважин.

Исходя из этого, в табл. 1 показан диапазон изменения параметров расположения скважин в веере для условий отбойки экс-

Таблица 1

Диапазон изменения параметров расположения скважин в веере

Диаметр заряда, мм	Кол-во скважин, шт.	ЛНС, м	Коэффициент сближения
60	9	1,0	3,5
	10	2,0	1,5
	12	3,0	0,85
80	6	1,0	5
	6	2,0	2,5
	7	3,0	1,6
	7	4,0	1,2
100	5	1,0	6,0
	5	2,0	3,0
	5	3,0	2,0
	5	4,0	1,5
120	5	1,0	6,0
	5	2,0	3,0
	5	3,0	2,0
	5	4,0	1,5

Таблица 2

Рекомендуемые параметры расположения скважин для экспериментальных испытаний

№ эксперимента	Диаметр скважин, мм	ЛНС, м	Расстояние между концами скважин, м	Коэффициент сближения
1	105	2,5	3,2	1,3
2	105	2,0	4,0	2,0
3	65	1,6	1,8	1,1
4	65	1,5	2,2	1,5

периментальной камеры, обеспечивающей надежный отрыв отбиваемого слоя от массива.

Приведенные в табл. 1 параметры БВР обеспечивают только одно технологическое требование – полноту отрыва отбиваемого слоя. Вторым требованием является обеспечение необходимой степени дробления кварца, т.е. ограничение выхода негабаритных кусков размером +700 мм, который определяется полнотой раскрытия естественных трещин кварцевого массива. Энергии, необходимой для отрыва отбиваемого слоя, может оказаться недостаточно для требуемого дробления массива. Степень дробления отбитого слоя определяется интенсивностью его трещиноватости, углом наклона трещин, материалом их заполнения, действующими в массиве напряжениями горного давления. Эти величины носят стохастический характер, что не позволяет произвести их аналитическую оценку.

С учетом этих соображений целесообразно произвести экспериментальные взрывы с параметрами расположения скважин, показанными в табл. 2.

Первые экспериментальные взрывы (№ 1, № 3) позволят уточнить параметры БВР, обеспечивающие технологические требования к массовой отбойке кварца и полученный при этом гранулометрический состав рудной массы, вторые – (№ 2, № 4) позволят оценить возможность снижения удельного расхода ВВ, тенденции снижения выхода некондиционной мелкой фракции кварца (-20 мм) и уточнить методические подходы к определению оптимальных параметров БВР для стадии опытно-промышленного внедрения технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. *Соколов И. В.*, *Антипин Ю. Г.*, *Барановский К. В.* Изыскание подземной геотехнологии для отработки рудного тела средней мощности и наклонного падения Кыштымского месторождения гранулированного кварца // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – № 2. – С. 17–22.

3. *Барановский К. В.* Влияние горно-геологических факторов на эффективность подземной отработки наклонных залежей средней мощности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № S11. – С. 288–293.

4. *Кузьмин В. Г.*, *Кравец Б. Н.* Минералургия жильного кварца. – М.: Недра, 1990. – 294 с.

5. *Götze J., Plötze M., Fuchs H., Habermann D.* Origin, spectral characteristics and practical applications of the cathodoluminescence (CL) of quartz – a review // Mineralogy and Petrology. 2001. Vol. 71. P. 225–250.

6. *Воронов Е. Т.*, *Бондарь И. А.* Кристаллосберегающие технологии подземной разработки месторождений горного хрусталя // Горный журнал. 2011. – № 11. – С. 23–25.

7. *Burkle W. S.* Optimum drilling and blasting procedures // Pit & Quarry. – 1985. – Vol. 77. – P. 30–34.

8. *Воронов Е. Т.*, *Бондарь И. А.* Обоснование и разработка минералосберегающих технологий добычи ценного самоцветного сырья с использованием буровзрывных работ // Вестник ЗабГУ. – 2014. – № 02(105). – С. 9–15.

9. *Кутузов Б. Н.* Методы ведения взрывных работ. Взрывные работы в горном деле и промышленности – М.: Горная книга, МГГУ, 2008. – 512 с.

10. *Белин В. А.*, *Крюков Г. М.* Итоги развития теории разрушения горных пород взрывом // Взрывное дело. – 2011. – № 105/62 . – С. 33–46.

11. *Горинов С. А.* Эффективность применения плоских систем зарядов для отбойки сильнотрещиноватых руд в подземных условиях // Известия вузов. Горный журнал. – 1985. – № 7. – С. 68–73.

12. *Горинов С. А.*, *Смирнов А. А.* Действие взрыва плоской системы зарядов ВВ при отбойке горного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2001. – № 4. – С. 42–50.

13. *Баум Ф. А.*, *Орленко Л. П.*, *Станюкович К. П.*, *Челышев В. П.*, *Шехтер Б. И.* Физика взрыва. – М.: Наука, 1975. – 704 с.

14. *Горинов С. А.* Отбойка напряженных трещиноватых руд плоскими системами зарядов: Дис. канд. техн. наук. – Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1985. – 198 с.

15. *Казаков Н. Н.*, *Шляпин А. В.*, *Лапиков И. Н.* Модель полости и некоторые параметры квазистатической фазы взрыва скважинного заряда конечной длины // Взрывное дело. – 2013. – № 109/66. – С. 3–17.

16. *Менжулин М. Г. Афанасьев П. И.*, *Казьмина А. Ю.* Расчет диссипации энергии на основе определения наведенной трещиноватости при распространении волны напряжений // Взрывное дело. – 2013. – № 109/66. – С.73–78.

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

18. *Шапурин А. В.*, *Васильчук Я. В.* Качество дробления горных пород как результат комплексного влияния различных факторов // Вестник КТУ. – 2011. – № 29. – С. 13–17.

19. *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.

20. *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. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Соколов Игорь Владимирович[1] – доктор технических наук, зав. лабораторией, e-mail: geotech@igduran.ru,
Смирнов Алексей Алексеевич[1] – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Рожков Артем Андреевич[1] – аспирант, младший научный сотрудник,
[1] ИГД УрО РАН.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 7, pp. 337–350.

UDC 622.235

I.V. Sokolov, A.A. Smirnov, A.A. Rozhkov

JUSTIFICATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF DRILLING AND BLASTING AT THE BREAKING OF THE QUARTZ

Kyshtym deposit of high-value granular quartz is virtually the only source of raw materials for high-tech sectors of the Russian economy. Currently, the deposit is developed by underground mining with blasting. The applied technology of drilling and blasting operations using of packaged explosives, manual charging and tamping clay laborious and does not provide the required parameters of output and oversize overgrinding quartz fraction -20 mm. Consequently, actual improvements in technology and the optimization of the parameters of blasting operations. The technology of breaking with vertical bores and using mechanized charging granular explosives and lump blasting of all the charges made. As shown by theoretical studies and laboratory experiments, the degree of reduction in the breaking of overgrinding quartz can be achieved through the use of the synergies of the charges at their simultaneous blasting holes, the result of which is the formation of a common cavity explosion without overgrinding zones around each charge. Based on the results of theoretical research and laboratory experiments, mathematical simulation of blasting parameters for the proposed development of the industrial implementation of the pilot site Kyshtym deposits.

Key words: quartz deposit, drilling and blasting operations, mechanized charge, granulated explosives, overgrinding, laboratory experiment landfill, mathematical modeling, research and industrial application.

AUTHORS

Sokolov I.V.[1], Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, e-mail: geotech@igduran.ru,

Smirnov A.A.[1], Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Rozhkov A.A.[1], Graduate Student, Junior Researcher,
[1] Institute of Mining of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
620075, Ekaterinburg, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Unique Project Identifier RFMEF160714X0026.).

REFERENCES

1. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Yu. G., Baranovskiy K. V., Rozhkov A. A. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no 6, pp. 133–145.

2. Sokolov I. V., Antipin Yu. G., Baranovskiy K. V. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2013, no 2, pp. 17–22.

3. Baranovskiy K. V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no S11, pp. 288–293.

4. Kuz'min V. G., Kravets B. N. *Mineralurgiya zhil'nogo kvartsa* (Quartz Mineralurgy), Moscow, Nedra, 1990, 294 p.

5. Götze J., Plötze M., Fuchs H., Habermann D. Origin, spectral characteristics and practical applications of the cathodoluminescence (CL) of quartz a review. *Mineralogy and Petrology*. 2001. Vol. 71. P. 225–250.

6. Voronov E. T., Bondar' I. A. *Gornyy zhurnal*. 2011, no 11, pp. 23–25.

7. Burkle W. S. Optimum drilling and blasting procedures. *Pit & Quarry*. 1985. Vol. 77. P. 30–34.

8. Voronov E. T., Bondar' I. A. *Vestnik ZabGU*. 2014, no 02(105), pp. 9–15.

9. Kutuzov B. N. *Metody vedeniya vzryvnykh rabot. Vzryvnye raboty v gornom dele i promyshlennosti* (The methods of blasting. Blasting and mining industry), Moscow, Gornaya kniga, MGGU, 2008, 512 p.

10. Belin V. A., Kryukov G. M. *Vzryvnoe delo*. 2011, no 105/62 , pp. 33–46.

11. Gorinov S. A. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 1985, no 7, pp. 68–73.

12. Gorinov S. A., Smirnov A. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2001, no 4, pp. 42–50.

13. Baum F. A., Orlenko L. P., Stanyukovich K. P., Chelyshev V. P., Shekhter B. I. *Fizika vzryva* (Физика взрыва), Moscow, Nauka, 1975, 704 p.

14. Gorinov S. A. Otboyka napryazhennykh treshchinovatykh rud ploskimi sistemami zaryadov (Breaking tensions fractured ores flat charge system), Candidate's thesis, Sverdlovsk, IGD MChM SSSR, 1985, 198 p.

15. Kazakov N. N., Shlyapin A. V., Lapikov I. N. *Vzryvnoe delo*. 2013, no 109/66, pp. 3–17.

16. Menzhulin M. G. Afanas'ev P. I., Kaz'mina A. Yu. *Vzryvnoe delo*. 2013, no 109/66, pp. 73–78.

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

18. Shapurin A. V., Vasil'chuk Ya. V. *Vestnik KTU*. 2011, no 29, pp. 13–17.

19. 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.

20. 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.