

Оценка эффективности применения электронных инициирующих устройств «ИСКРА-Т» по условиям дробления и сейсмического действия торцевых взрывов

С.А. Козырев✉, Е.А. Власова, А.В. Соколов, Е.А. Усачев

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉s.kozyrev@ksc.ru

Резюме: Теоретическим путем обоснован оптимальный интервал замедления при одновременном взрывании скважин в веере – наиболее оптимальным является интервал при задержке взрывания между скважинами в 15 мс. Проведены эксперименты по условиям дробления и сейсмического действия торцевых взрывов в подземных условиях Расвумчоррского рудника при применении электронных инициирующих устройств «Искра-Т» с замедлениями – 10, 15 и 20 мс. При интервалах замедлений 10 и 15 мс нет четкого разделения ступеней и имеет место интерференция волн сжатия последовательно взрывааемых зарядов, а их совместное взаимодействие приводит к незначительному увеличению сейсмического воздействия на горные выработки. По результатам мониторинга выпуска руды выход негабарита при указанных замедлениях на весь объем отбойки от каждого взрыва составлял не более 10 шт. При интервале замедления в 20 мс получено четкое разделение ступеней при минимальном выходе негабарита – 7 шт. на весь объем выпуска. В целях обеспечения приемлемого качества дробления горной массы и снижения сейсмического действия взрыва на горные выработки, а также для сохранности скважин, пробуренных на опережение, целесообразно применять обратное инициирование с одновременным взрыванием скважин в веере с интервалом замедления между ними в 20 мс.

Ключевые слова: скважинная отбойка, короткозамедленное взрывание, сейсмическое действие взрыва, интервалы замедлений, системы инициирования

Для цитирования: Козырев С.А., Власова Е.А., Соколов А.В., Усачев Е.А. Оценка эффективности применения электронных инициирующих устройств «ИСКРА-Т» по условиям дробления и сейсмического действия торцевых взрывов. *Горная промышленность*. 2021;(2):107–113. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-107-113.

Evaluation of the efficient application of «Iskra-T» electronic initiating devices in terms of crushing and seismic action of face blasts

S.A. Kozyrev✉, E.A. Vlasova, A.V. Sokolov, E.A. Usachev

Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russian Federation
✉s.kozyrev@ksc.ru

Abstract: The paper justifies the optimal delay time in non-synchronous fan blasting with the most optimal delay time between the holes being 15 ms. Experiments were conducted to assess the breaking conditions and seismic effects of face blasts in the underground conditions of the Rasvumchorsky mine using the Iskra-T electronic initiating systems with delay times of 10, 15 and 20 ms. With the delay times of 10 and 15 ms there is no clear segregation of the blast stages and interference of compression waves, created by consecutively blasted charges, takes place, while their joint interaction leads to insignificant increase of the seismic effects on the mine workings. According to the results of ore drawing monitoring, the number of boulders with the above delay times did not exceed 10 pieces for the whole blasted volume for each round. With the delay time of 20 ms a clear segregation of the blast stages was obtained with the minimum number of 7 boulders per blast. In order to ensure acceptable rock mass fragmentation quality and reduce the seismic effect of blasting on the mine workings, as well as to preserve the pilot holes drilled, it is advisable to use reverse initiation with non-synchronized fan blasting with the delay time of 20 ms between the holes.

Keywords: longhole stoping, short-delayed detonation, seismic action of the blast, delay intervals, initiation systems

For citation: Kozyrev S.A., Vlasova E.A., Sokolov A.V., Usachev E.A. Evaluation of the efficient application of «Iskra-T» electronic initiating devices in terms of crushing and seismic action of face blasts. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(2):107–113. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-107-113.

Введение

Многолетняя практика ведения горных работ показывает, что одним из важнейших резервов повышения эффективности и оптимизации затрат на буровзрывные работы является внедрение взрывных технологий на базе современных взрывчатых материалов: взрывчатых веществ и средств инициирования зарядов. В последние десятилетия технология ведения буровзрывных работ получила бурное развитие. Появление новых технологий затрагивает весь спектр буровзрывных работ – от внедрения высокопроизводительных буровых станков до перехода на более безопасные эмульсионные взрывчатые вещества и применение новых средств инициирования зарядов. К настоящему времени практически на всех горнорудных предприятиях применяются неэлектрические системы инициирования (НСИ), что позволяет регулировать последовательность взрывания скважинных зарядов посредством различной коммутации взрывной сети, а также быстрое и простое изменение интервалов замедлений между зарядами, что максимально повышает управляемость процессом разрушения массива.

Достижение заданной интенсивности дробления горных пород и снижение сейсмического действия взрыва возможно только при правильно выбранных параметрах буровзрывных работ и последовательности взрывания скважинных зарядов и интервалов замедлений между ними. Решению данного вопроса посвящено огромное количество исследований, в том числе и проведенных Горным институтом КНЦ РАН [1–13]. Следует отметить, что большинство исследований, посвященных короткозамедленному взрыванию (КЗВ), проведено в условиях открытых горных работ. Но и для этих условий не выработано единого мнения по установлению оптимального интервала замедлений как между скважинами, так и между рядами скважин. Все рекомендации по интервалам замедлений в зависимости от условий взрывания находятся в диапазоне от 5 до 300 мс.

На горнорудных предприятиях, отрабатывающих запасы апатит-нефелиновых руд подземным способом, применяется система разработки очистных блоков с поэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. Отличительной особенностью системы поэтажного обрушения является то, что панели и секции обруиваются веерами глубоких скважин на всю их длину еще до начала их отработки, а отбойка на подэтажах производится в отступающем порядке от обрушения или отрезной щели единичными веерами (по условиям выпуска руды, как правило, взрывают один веер) на зажимающую среду с наличием только одной свободной поверхности. При принятых параметрах секций время «стояния» пробуренных скважин может составлять несколько месяцев. Обеспечение сохранности скважин в таких условиях и снижение сейсмического действия массовых взрывов являются первоочередными задачами, так как потери скважин и их отклонение от проектных значений приводят к неуправляемому дроблению полезного ископаемого. Выход негабарита в данной системе разработки составляет до 10%, а разубоживание 20–30%.

Типичная схема взрывных работ в подземных рудниках включает одновременное инициирование всех скважин в веере, что приводит к повышенному сейсмическому действию массовых взрывов на буро-доставочные выработки и массив пород за проектным контуром отбойки.

Для учета этого влияния в программном продукте Ansys Autodyn выполнено компьютерное моделирование взрыва

веера глубоких скважин в массиве пород. Основными параметрами модели взрыва являются: ЛНС – 2,8 м, диаметр скважинных зарядов – 102 мм. В качестве взрывчатых веществ принято эмульсионное ВВ марки «Сабтэк». Иницирование скважинных зарядов – обратное при одновременном их взрывании. Разработанная модель позволяет произвести оценку поля напряжений (рис. 1), а также степень нарушения вмещающего массива (рис. 2).

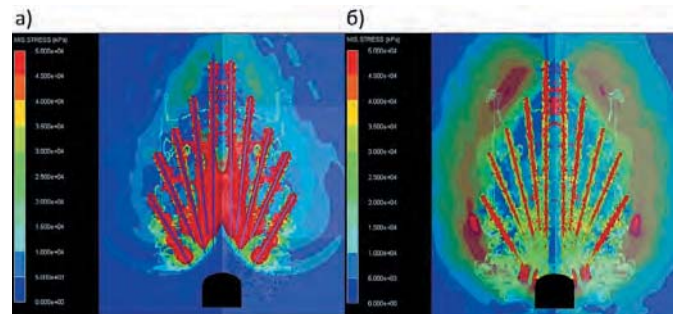


Рис. 1
Поле эквивалентных напряжений при одновременном инициировании скважин в веере на момент времени: а – 2 мс, б – 5 мс после инициирования зарядов

Fig. 1
Equivalent stress field during simultaneous fan blast initiation at the following time moments: а – in 2 ms, б – in 5 ms after the blast initiation

Из представленных ниже результатов моделирования следует, что наиболее интенсивные нарушения в тыльную часть от веера даже в сплошном массиве могут достигать половины величины ЛНС (рис. 2), а уровень сейсмического воздействия на буро-доставочную выработку и смежный веер превышать допустимые значения, приводящие к разрушению приконтурного слоя выработки и самих скважин.

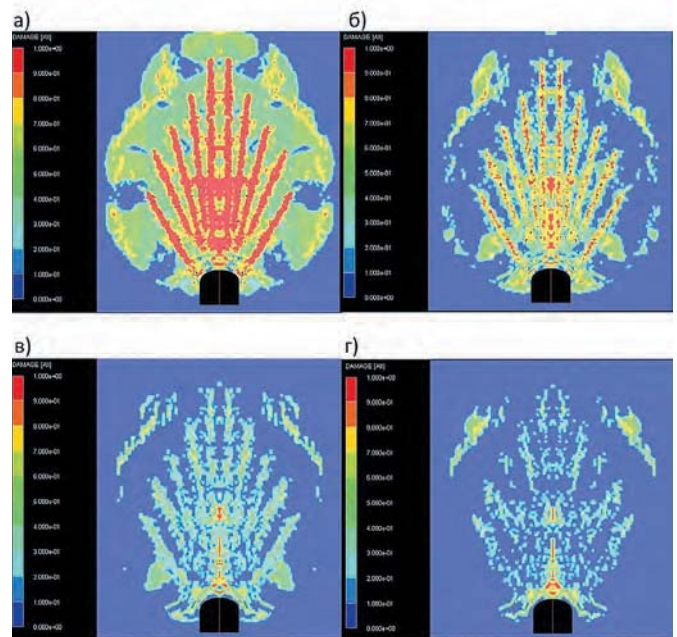


Рис. 2
Нарушения вмещающего массива на момент времени 10 мс в плоскости, находящейся на расстоянии от веера: а – 0,2 м, б – 0,4 м, в – 0,6 м, г – 0,8 м

Fig. 2
Disturbance of the host rock at the time of 10 ms in a plane located at a following distances from the fan: а – 0.2 m, б – 0.4 m, в – 0.6 m, г – 0.8 m



Рис. 3
Характер нарушений в кровле
выработки при одновременном
взрывании скважин в веере

Fig. 3
Disturbance pattern in the
roof the excavation at
simultaneous fan blasting

В качестве примера на рис. 3 приведено наиболее характерное нарушение в кровле выработки при одновременном взрывании скважин в веере, а на рис. 4 – характер нарушений скважин веера.

Кроме того, если использовать одновременное взрывание скважин в веере, то, кроме увеличенного сейсмического действия на скважины последующего веера, с каждым взрывом на зажатую среду происходит переуплотнение руды при взрывании крайних скважин, и при определенных расстояниях от границы отбойки взрывание будет происходить в условиях камуфлета.

Следовательно, чтобы повысить эффективность взрывных работ, необходимо обеспечить разновременное взрывание скважин в веере в определенной последовательности с оптимальными интервалами замедления между скважинами.

Результаты и обсуждение

Наиболее предпочтительной для данной системы разработки является следующая последовательность взрывания скважин в веере: две центральные скважины необходимо взрывать на одно замедление для создания врубовой полости; остальные скважины в веере необходимо взрывать разновременно по отношению к врубовым и предыдущим скважинам, но одновременно друг с другом. Такая последовательность позволит улучшить качество дробления из-за взрыва на две свободные поверхности (на поверхность, созданную врубом, и поверхность по ЛНС), благодаря чему снизится вероятность пробоя между скважинами по сравнению с одновременным взрыванием (рис. 5).

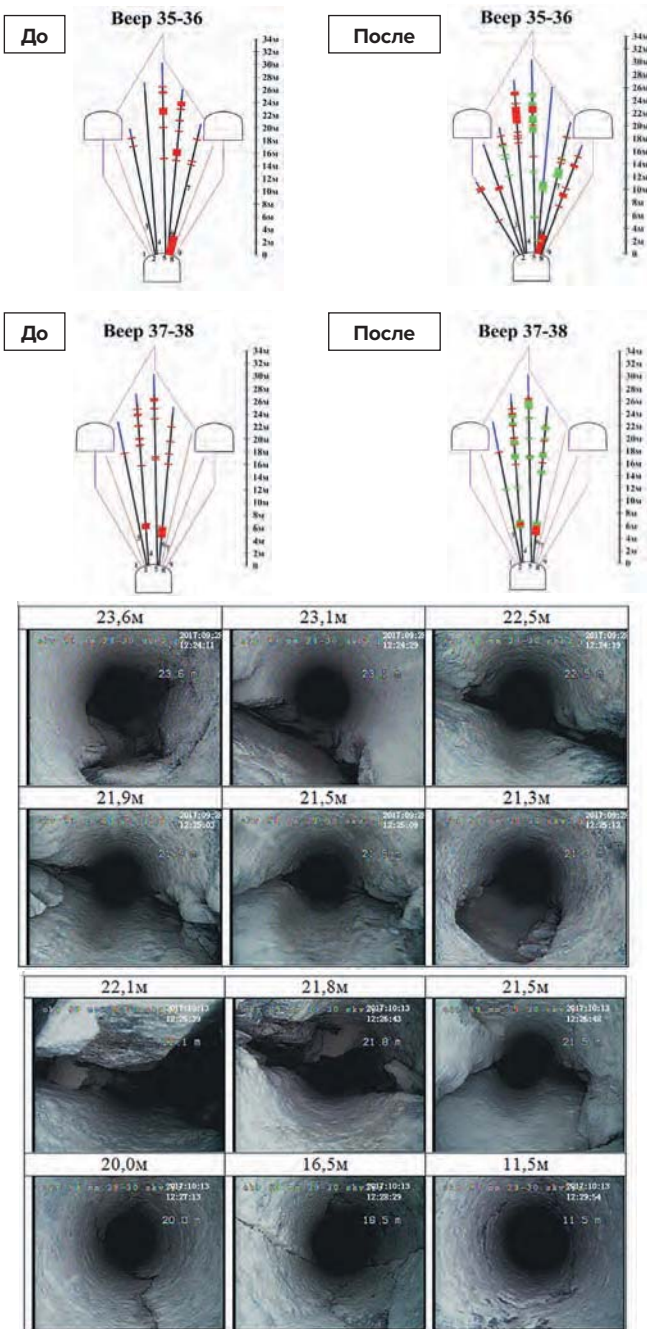


Рис. 4
Проектные и фактические
длины скважин в веерах и
нарушения скважин по их длине
до и после отбойки смежного
веера на Кировском руднике
КФ АО «Апатит»

Fig. 4
Design and actual hole depths
in the fans and disturbances
along the hole length before
and after the adjacent fan
blasting at the Kirovsky mine,
Kirovsk Branch of Apatit JSC

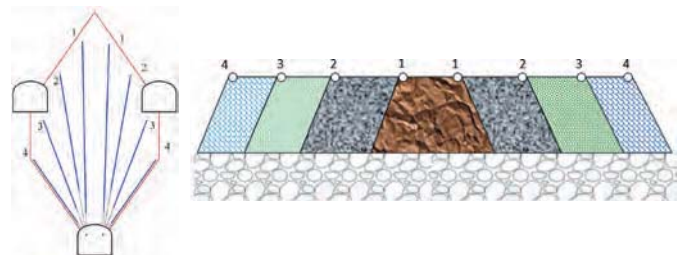


Рис. 5
Схема обуривания массива и
очередность взрывания
скважин в веере при
разновременном взрывании
групп скважин

Fig. 5
Rock mass drilling pattern and
sequence of hole blasting in a
fan when groups of boreholes
are blasted at different times

При выполнении рассмотренной последовательности взрывания остается нерешенным вопрос о выборе интервала замедления при взрыве групп зарядов в веере. Ранее [14; 15] было показано, что применительно к открытым горным работам максимально эффективные взаимодействия полей напряжений и максимальные разрушения приходятся на интервал замедления в 15 мс. Это объясняется тем, что ударная волна последующего заряда оказывает дополнительное воздействие на зону трещинообразования от предыдущего заряда и обеспечиваются условия

многократного воздействия на зону трещинообразования. Дальнейшее увеличение интервала замедления не приводит к интенсификации дробления.

При рекомендуемой последовательности взрывания скважин в веере определяющим фактором в выборе интервала замедления для последующих групп является взрыв первой группы зарядов (две центральные скважины) для создания врубной полости.

При моделировании взрыва на свободную поверхность двух центральных скважин выявлено, что вспучивание свободной поверхности начинается через 10–15 мс после начала инициирования, и в это время создаются благоприятные условия для взрыва следующей группы зарядов. Таким образом, с точки зрения дробления наиболее оптимальным является интервал замедления между группами скважин в 15 мс (рис. 6).

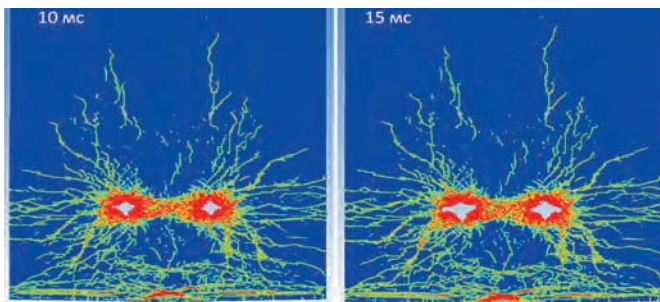


Рис. 6
Развитие трещин и вспучивание свободной поверхности при одновременном взрыве двух зарядов через 10 и 15 мс после инициирования

Fig. 6
Cracking and swelling of the free surface due to simultaneous blasting of two charges in 10 and 15 ms after the blast initiation

Поэтому в рассматриваемых условиях взрывание каждой последующей группы скважин в веере необходимо производить в момент, когда часть массива уже частично нарушена взрывом предыдущей скважины, но действие напряжений в массиве еще продолжается.

Указанный интервал замедлений был рекомендован для одновременного взрывания скважин в веерах для системы разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды на подземных рудниках КФ АО «Апатит».

В настоящее время для инициирования скважинных зарядов на подземных рудниках КФ АО «Апатит» используют НСИ Exel™ LP. Минимальный интервал замедления для этих устройств составляет 25 мс. В последующих ступенях LP 100 – LP 600 интервал замедления между ступенями составляет 50 мс; LP 600 – LP 1200 – 100 мс; LP 1200 – LP 2000 – 200 мс. Следовательно, обеспечить рекомендуемый интервал замедления не представляется возможным.

Поэтому при испытаниях были использованы электронные инициирующие устройства «Искра-Т» НПО «Искра», предназначенные для инициирования с высокой точностью замедления боевиков скважинных и шпуровых зарядов при проведении взрывных работ на земной поверхности и в подземных выработках шахт и рудников.

В представляемой работе первоначально была проведена оценка точности срабатывания электронных инициирующих устройств «Искра-Т», и показано, что минимальное отклонение составляет 1,4 мс; максимальное – 3,0 мс; при заявленном значении отклонений 1,0 мс.

В дальнейшем была проведена оценка эффективности применения электронных инициирующих устройств

«Искра-Т» по условиям дробления и сейсмического действия торцевых взрывов с выдачей рекомендаций по интервалам замедлений при торцевой отбойке. Экспериментальные работы проводились на Расвумчоррском руднике КФ АО «Апатит».

Сейсмомониторинг взрывов осуществлялся с использованием трех комплектов аппаратуры фирмы «Instantel» (Канада). Регистрация взрывов производилась в смежных буродоставочных выработках.

Для выявления влияния интервала замедления между скважинами в веере на степень дробления были проведены эксперименты с замедлениями 10, 15 и 20 мс, как наиболее приемлемыми с точки зрения дробления массива. В экспериментах оценивалось сейсмическое действие и качество отбойки по результатам выпуска руды.

Взрывание веера с интервалом замедления между группами скважин 10 мс

Сейсмограмма колебаний и время замедления между скважинами в веере представлены на рис. 7.

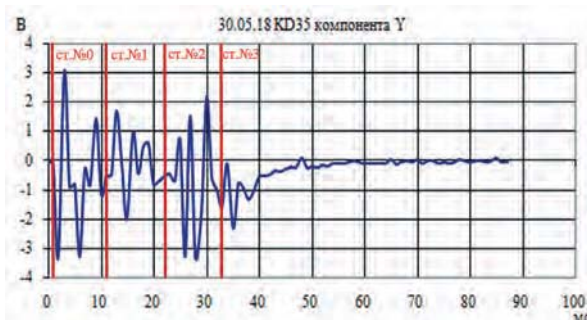


Рис. 7
Сейсмограмма колебаний при взрывании веера с интервалом замедления между группами скважин 10 мс

Fig. 7
Motion seismogram of fan blasting with delay time of 10 ms between groups of boreholes

На сейсмограмме видно, что группы скважин в веере взрывались с интервалом 9–11 мс, что практически соответствует заявленным значениям, но нет четкого разделения ступеней, а их совместное взаимодействие приводит к увеличению сейсмического воздействия на горные выработки. По результатам выпуска было отмечено хорошее качество дробления. Выход негабарита составил менее 15 шт. на весь объем выпуска (рис. 8).



Рис. 8
Фракционный состав после выпуска 805 т руды при взрыве веера с интервалом замедления между группами скважин 10 мс

Fig. 8
Size distribution after drawing of 805 tonnes of ore as the result of fan blasting with delay time of 10 ms between groups of boreholes

Взрывание веера с интервалом замедления между скважинами 15 мс

Сейсмограмма колебаний и время замедления между скважинами в веере представлены на рис. 9.

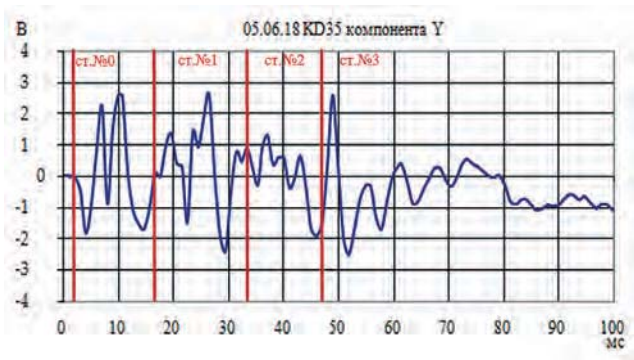


Рис. 9
Сейсмограмма колебаний и времена срабатывания ступеней при взрыве веера с замедлением между скважинами 15 мс

Fig. 9
Motion seismogram and firing times of fan blasting with delay time of 15 ms between the boreholes

Из сейсмограммы следует, что группы скважин в веере взрывались с интервалом 15–16 мс, что соответствует заявленным значениям. Также можно видеть, что нет четкого разделения ступеней. За время ведения очистной добычи по данному буровому выход негабаритов был минимальным (рис. 10).



Рис. 10
Фракционный состав после выпуска 2679 т руды при взрыве веера с замедлением между группами скважин 15 мс

Fig. 10
Size distribution after drawing of 2679 tonnes of ore as the result of fan blasting with delay time of 15 ms between groups of boreholes

Взрывание веера с интервалом замедления между скважинами 20 мс

Сейсмограмма колебаний и время замедления между скважинами в веере представлены на рис. 11.

Из сейсмограммы следует, что все скважины в веере взрывались с интервалом от 18 до 24 мс, что также практически соответствует заявленному значению. Сейсмограмма взрыва с замедлением между группами скважин 20 мс

фиксирует четкое разделение ступеней, по сравнению с замедлениями 10 и 15 мс.

Объем выпуска руды составил 3199 т. Во время ведения очистной добычи выход негабаритов составил 7 шт. (рис. 12).

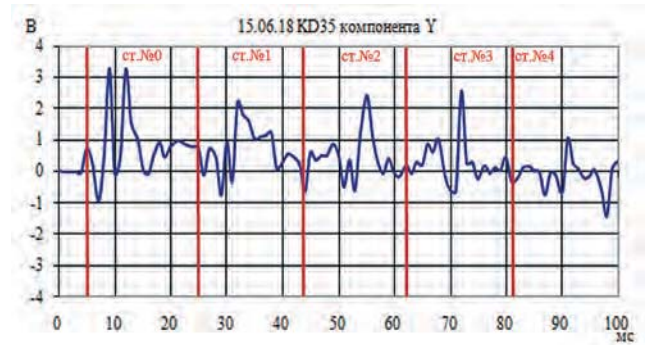


Рис. 11
Сейсмограмма колебаний и времена срабатывания ступеней при взрыве веера с замедлением между группами скважин 20 мс

Fig. 11
Motion seismogram and firing times of fan blasting with delay time of 20 ms between groups of boreholes



Рис. 12
Фракционный состав после выпуска 2861 т руды при взрыве веера с интервалом замедления между группами скважин 20 мс

Fig. 12
Size distribution after drawing of 2861 tonnes of ore as the result of fan blasting with delay time of 20 ms between groups of boreholes

Заключение

1. Теоретическим путем обоснован оптимальный интервал замедления при одновременном взрывании скважин в веере и установлено, что максимальные разрушения массива горных пород между скважинами приходятся при задержке взрывания между скважинами в 15 мс. При моделировании взрыва на свободную поверхность выявлено, что вспучивание свободной поверхности начинается через 10–15 мс после начала инициирования, и в это время создаются благоприятные условия для взрыва следующей серии зарядов. Таким образом, с точки зрения дробления наиболее оптимальным является интервал замедления между скважинами в 15 мс.
2. Произведена оценка эффективности применения элек-

тронных инициирующих устройств «Искра-Т» по условиям дробления и сейсмического действия торцевых взрывов в подземных условиях Расвумчоррского рудника. Эксперименты проведены со следующими замедлениями – 10, 15 и 20 мс. Выявлено, что при интервалах замедлений 10 и 15 мс нет четкого разделения ступеней и имеет место интерференция волн сжатия последовательно взрывааемых зарядов, а их совместное взаимодействие приводит к незначительному увеличению сейсмического воздействия на горные выработки. По результатам мониторинга выпуска руды выход негабарита при указанных замедлениях на весь объем отбойки от каждого взрыва составлял не

более 10 шт.

3. При интервале замедления в 20 мс получено четкое разделение ступеней по сравнению с замедлениями 10 и 15 мс при минимальном выходе негабарита (7 шт. на весь объем выпуска).

4. Таким образом, с целью снижения сейсмического действия на горные выработки, прилегающие к плоскости отбойки, и улучшения степени дробления оптимальным является интервал замедления между скважинами 20 мс.

Список литературы

1. Сакерин А.С., Константинов Д.О., Козырев С.А., Оверченко М.Н. Эмульсионные взрывчатые вещества, зарядное оборудование и взрывные технологии для подземных горных работ. *Горный журнал*. 2014;(10):38–41. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/1355/article/23240/> (дата обращения: 18.02.2021)
2. Токарев М.В., Кузенков М.В., Расторгуев Р.Г., Оверченко М.Н. Опыт изготовления и использования эмульсионных взрывчатых веществ на открытых и подземных горных работах в АО «Кольская ГМК». *Горный журнал*. 2015;(6):64–67. DOI: 10.17580/gzh.2015.06.13.
3. Машуков В.И. *Действие взрыва на окружающую среду и способы управления им*. М.: Недра; 1976. 248 с.
4. Артемьев Э.П., Трясцин А.В. Обоснование оптимальных интервалов времени замедления при производстве массовых взрывов на карьерах. *Известия вузов. Горный журнал*. 2013;(2):84–87.
5. Совмен В.К., Эквист Б.В. Методика расчетов интервалов замедлений при производстве массовых взрывов с использованием неэлектрических систем инициирования зарядов. *Горный журнал*. 2006;(8):67–68.
6. Ермолаев А.И., Токмаков В.В., Тетерев Н.А., Штрек А.С. Механизм разрушения горных пород при короткозамедленном взрывании (КЗВ) и расчет интервалов замедления. В: Валиев Н.Г. (ред.) *Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: сб. докл. 3-й Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 22–23 апр. 2014 г.* Екатеринбург: Изд-во УГГУ; 2014. С. 75–79. Режим доступа: <http://science.ursmu.ru/upload/doc/2014/07/15/IGT-2014.pdf> (дата обращения: 18.02.2021)
7. Зуева И.А., Лебедев А.А. Сейсмический эффект промышленных взрывов Костомукшского ГОКа. *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2020;23(1):22–28. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-22-28.
8. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Серёжников Н.А. и др. Сейсмологический мониторинг промышленных взрывов как эффективный подход к контролю сейсмического воздействия на недра. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019;2(2):56–66. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-2-2-56-66.
9. Shi X., Qiu X., Zhou J., Wang Y., Nie J., Li B.H. Technology and case study of ultra-large section and high shaft excavation by short-millisecond spherical-like blasting. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2016;35(8):1659–1667.
10. Лысак Ю.А., Плотников А.Ю., Шевкун Е.Б., Лещинский А.В. Повышение сейсмической безопасности при взрывных работах. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017;(4):283–292. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2017/4/283_292_4_2017.pdf (дата обращения: 18.02.2021)
11. Митюшкин Ю.А., Лысак Ю.А., Плотников А.Ю., Ружицкий А.В., Шевкун Е.Б., Лещинский А.В. Оптимизация параметров взрывных работ увеличением интервалов замедления. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015;(4):341–348. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2017/4/272_282_4_2017.pdf (дата обращения: 18.02.2021)
12. Qiu X., Shi X., Gou Y., Zhou J., Chen H., Huo X. Short-delay blasting with single free surface: Results of experimental tests // *Tunneling and Underground Space Technology*. 2018;74:119-130. DOI 10.1016/j.tust.2018.01.014
13. Qiu X., Hao Y., Shi X., Hao H., Zhang S., Gou Y. Numerical simulation of stress wave interaction in short-delay blasting with a single free surface. *PLoS ONE*. 2018;13(9):e0204166. DOI: 10.1371/journal.pone.0204166.
14. Козырев С.А., Соколов А.В., Сакерин А.С. Оценка оптимального времени замедления между скважинами при их разновременном взрывании в веере. *Взрывное дело*. 2014;(112/69):81–98. Режим доступа: https://sbornikvd.ru/vd_11269/index.html (дата обращения: 18.02.2021)
15. Козырев С.А., Камянский В.Н., Аленичев И.А. Оценка взаимодействия скважинных зарядов при различных интервалах замедлений между ними. *Взрывное дело*. 2017;(117/74):60–75. Режим доступа: https://sbornikvd.ru/vd_11774/index.html (дата обращения: 18.02.2021)

References

1. Sakerin A.S., Konstantinov D.O., Kozyrev S.A., Overchenko M.N. Emulsion explosives, loading equipment and blasting technologies in underground mining. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(10):38–41. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1354/article/23220/> (Accessed: 18.02.2021)
2. Tokarev O.V., Kuzenkov M.V., Rastorguev R.G., Overchenko M.N. Experience of emulsion explosives manufacturing and use in open pit and underground mines of Kola Mining and Metallurgical Company. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(6):64–67. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2015.06.13.
3. Mashukov V.I. *Environmental Effects of Blasting and Ways of their Control*. Moscow: Nedra; 1976. 248 p. (In Russ.)

4. Artemiev E.P., Tryastin A.V. Rationale of optimal temporary intervals of slowdown at mass explosions in quarries. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2013;(2):84–87. (In Russ.)
5. Sovmen V.K., Ekvist B.V. Technique of calculation of retarding intervals in execution of mass explosions using non-electric systems of charge initiation. *Gornyi Zhurnal*. 2006;(8):67–68. (In Russ.)
6. Ermolaev A.I., Tokmakov V.V., Teterev N.A., Shtrek A.S. Rock Fracture Mechanism in Blasting with Short Delay Time and Calculation of Delay Times. In: Valiev N.G. (ed.) *Innovative Geotechnologies in Ore and Non-Ore Mining: Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Assembly, Ekaterinburg, April 22-23, 2014*. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2014, pp. 75–79. Available at: <http://science.ursmu.ru/upload/doc/2014/07/15/IGT-2014.pdf> (Accessed: 18.02.2021)
7. Zueva I.A., Lebedev A.A. Seismic effect of industrial explosions of GOK Kostomuksha. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of MSTU*. 2020;23(1):22–28. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-22-28.
8. Emanov A.F., Emanov A.A., Serezhnikov N.A. et al. Seismological monitoring of industrial explosions as an effective approach to monitoring seismic exposure on bowels. *Interekspo Geo-Sibir*. 2019;2(2):56–66. (In Russ.) DOI: 10.33764/2618-981X-2019-2-2-56-66.
9. Shi X., Qiu X., Zhou J., Wang Y., Nie J., Li B.H. Technology and case study of ultra-large section and high shaft excavation by short-millisecond spherical-like blasting. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2016;35(8):1659–1667.
10. Lysak Yu.A., Plotnikov A.Yu., Shevkun E.B., Leshchinskiy A.V. Enhancement of seismic safety under blasting. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017;(4):283–292. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2017/4/283_292_4_2017.pdf (Accessed: 18.02.2021)
11. Shevkun E.B., Leshchinskiy A.V., Lysak Yu.A., Plotnikov A.Yu. Features of explosive loosening at the increased intervals of delay. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015;(4):341–348. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2017/4/272_282_4_2017.pdf (Accessed: 18.02.2021)
12. Qiu X., Shi X., Gou Y., Zhou J., Chen H., Huo X. Short-delay blasting with single free surface: Results of experimental tests // Tunneling and Underground Space Technology. 2018;74:119–130. DOI 10.1016/j.tust.2018.01.014
13. Qiu X., Hao Y., Shi X., Hao H., Zhang S., Gou Y. Numerical simulation of stress wave interaction in short-delay blasting with a single free surface. *PLoS ONE*. 2018;13(9):e0204166. DOI: 10.1371/journal.pone.0204166.
14. Kozyrev S.A., Sokolov A.V., Sakerin A.S. Estimation of optimal delay time between boreholes during their nonsimultaneous blasting in ring. *Vzryvnoe delo = Explosion technology*. 2014;(112/69):81–98. (In Russ.) Available at: https://sbornikvd.ru/vd_11269/en_index.html (Accessed: 18.02.2021)
15. Kozyrev S.A., Kamyansky V.N., Alenichev I.A. Estimation of interaction borehole charges at different delay time between them. *Vzryvnoe delo = Explosion technology*. 2017;(117/74):60–75. (In Russ.) Available at: https://sbornikvd.ru/vd_11774/en_index.html (Accessed: 18.02.2021)

Информация об авторах

Козырев Сергей Александрович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: s.kozyrev@ksc.ru.

Власова Елена Анатольевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: e.vlasova@ksc.ru.

Соколов Александр Всеволодович – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: wave-2000@mail.ru.

Усачев Евгений Андреевич – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: madly@bk.ru.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.02.2021

Поступила после рецензирования: 03.03.2021

Принята к публикации: 10.03.2021

Information about the authors

Sergey A. Kozyrev – Doctor of Engineering, Chief Researcher, Head of Laboratory, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: s.kozyrev@ksc.ru.

Elena A. Vlasova – Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: e.vlasova@ksc.ru.

Alexander V. Sokolov – Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: wave-2000@mail.ru.

Evgeny A. Usachev – Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: madly@bk.ru.

Article info

Received: 25.02.2021

Revised: 03.03.2021

Accepted: 10.03.2021