

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕРВАЛОВ ЗАМЕДЛЕНИЯ НА МЕХАНИЗМ ВЗРЫВНОГО РЫХЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Е. Б. Шевкун<sup>1</sup>, А. Ю. Плотников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тихоокеанский государственный университет 680035, г. Хабаровск,  
ул. Тихоокеанская, д.136. e-mail: ev.shevkun@yandex.ru

<sup>2</sup> ООО «АВТ — Амур», г. Благовещенск e-mail: plotnikov1960@hotmail.com

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы влияния интервалов замедления между последовательными взрывами скважинных зарядов на качество взрывного рыхления скальных пород взрывом с учетом двухстадийного механизма разрушения пород под действием взрывных нагрузок с целью выбора оптимальных величин замедления на основе последних достижений науки в области роста трещин в зоне разрушения каждого заряда. Выполнен анализ развития экспериментального массового взрыва с неудовлетворительными результатами. Порядное взрывание, инициированное волноводной системой с замедлением между рядами зарядов поверхностным детонатором номиналом 150 мс, а вдоль ряда — с замедлением в 8 мс, формируется за счет срабатывания волновода с замедлением 2 мс/м. Графическое моделирование развития экспериментального массового взрыва в сравнении с обычно применяемой схемой 400×200 мс помогло доказать, что зоны разрушения зарядов вдоль ряда развиваются не более 3 мс — до прихода волны напряжения от взрыва предыдущего заряда, которая останавливает формирование зоны разрушения. При схеме взрывания 400×200 мс происходит формирование зон разрушения до теоретически возможных размеров, что позволяет использовать на дробление экранирующий эффект ранее разрушенной горной массы, позволяющий отражать часть энергии волны напряжений в зону разрушения заряда и преломлять остальную энергию в ранее взорванную горную массу. Практически вся энергия взрыва заряда расходуется на дробление — развал горной массы за пределы блока отсутствует.

**Ключевые слова:** взрывное рыхление пород, волны напряжений, зоны дробления и предразрушения.

**Для цитирования:** Шевкун Е. Б., Плотников А. Ю. Влияние интервалов замедления на механизм взрывного рыхления горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 12-2. — С. 159–169. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_122\_0\_159.

### Effect of deceleration intervals on the mechanism of explosive loosening of rocks

E. B. Shevkun<sup>1</sup>, A. Yu. Plotnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, 680035  
e-mail: ev.shevkun@yandex.ru

<sup>2</sup> "AVT — Amur", Blagoveshchensk e-mail: plotnikov1960@hotmail.com

**Abstract:** The issues of the influence of deceleration intervals between successive explosions of borehole charges on the quality of explosive loosening of rocks by explosion, taking into account the two-stage mechanism of rock destruction under the action of explosive loads, in order to select the optimal values of deceleration based on the latest scientific achievements in the of crack growth in the zone of destruction of each charge. The analysis of the development of an experimental mass explosion with unsatisfactory results is carried out. An ordinal explosion initiated by a waveguide system with a deceleration between the rows of charges by a surface detonator with a nominal value of 150 ms, and along the row a deceleration of 8 ms is formed due to the activation of a waveguide with a deceleration of 2 ms/m. Graphical modeling of the development of an experimental mass explosion, in comparison with the commonly used 400x200 ms scheme, proved that the charge destruction zones along the row develop no more than 3 ms – before the arrival of a voltage wave from the explosion of the previous charge, which stops the formation of the destruction zone. With the 400x200 ms blasting scheme, destruction zones are formed to theoretically possible sizes, which allows the screening effect of a previously destroyed rock mass to be used for crushing, allowing part of the energy of the stress wave to be reflected into the charge destruction zone and the rest of the energy to be refracted into the previously exploded rock mass. Almost all the energy of the charge explosion is spent on crushing – there is no collapse of the rock mass outside the block.

**Key words:** explosive loosening of rocks, contacts of ores and rocks, displacement of rocks during an explosion.

**For citation:** Shevkun E. B., Plotnikov A. Yu. Effect of deceleration intervals on the mechanism of explosive loosening of rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):159–169. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_122\_0\_159.

---

## Введение

Подготовка к выемке скальных горных пород на карьерах проводится многорядным короткозамедленным взрыванием (МКЗВ) путем последовательного срабатывания с миллисекундными замедлениями смонтированных в общую протяженную взрывную сеть многочисленных скважинных зарядов. Основное влияние на степень дробления и параметры развала горной массы оказывает интервал времени замедления между последовательно взрывающимися скважинными зарядами. Несмотря на многочисленные теоретические и эмпирические методики его определения [1–5], единой точки зрения о процессах, проходящих при отбойке горных пород МКЗВ, не выработано, поэтому расчётные значения интервалов замедления в одинаковых условиях взрывания могут изменяться от 6 до 42 мс [6].

Специалистами ООО «АВТ-Амур» и сотрудниками Тихоокеанского государственного университета накоплен значительный опыт ведения взрывных работ с использованием неэлектрических систем инициирования на базе волноводов при увеличенных интервалах замедления, который подтверждает, что качество дробления скальных массивов горных пород при поскважинном МКЗВ определяется именно величиной интервалов между ступенями замедления [7, 8]. Применение замедлений выше 100 мс между последовательно взрывающимися скважинными зарядами коренным образом изменяет механизм взрывного разрушения массива горных пород при МКЗВ. Можно выделить три главных аспекта этих изменений.

Первое, и это главное, — при таких замедлениях полностью используются как энергия волновых процессов, формирующая зоны дробления и трещи-

нообразования, так и энергия сильно сжатых продуктов детонации, проникающих в эти трещины и обеспечивающих их рост расклинивающим действием до достижения равенства между силами расклинивания и сопротивления горной породы разрыву (наименьшее из трех сопротивлений породы разрушению). К. Хино [9] утверждает, что при МКЗВ взрывы зарядов предыдущей очереди образуют дополнительные поверхности обнажения, где распирающее действие газов взрыва последующей очереди продолжается от 10 до 100 мс. Увеличение интервалов замедления позволяет прорасти трещинам под распирающим действием продуктов взрыва последующих зарядов на теоретически возможную глубину. Это обеспечивает достижение предельно возможных размеров радиуса зоны трещинообразования, ибо за время действия взрывного импульса волна напряжений в массиве успевает охватить всю зону возможного разрушения [10].

Второе — за это время у горной массы успевает сформироваться под действием ранее взорванных зарядов экранирующая (отражающая) поверхность, существенно меняющая картину взаимодействия энергии волн напряжения с массивом горных пород [11]. До 30% энергии волны напряжений отражается от экрана и возвращается в виде волны растяжения в массив, разрушаемый взрывающимся зарядом, накладываясь на хвостовую часть падающей волны. Их результирующие усилия могут превосходить предел прочности на растяжение в направлении действия как нормальных, так и тангенциальных напряжений. В горную массу от ранее взорванных зарядов преломляется около 70% энергии волны напряжений, проводя работу по переупаковке обломков и их доразрушению. При взрывании отдельных

зарядов волны напряжений распространяются от каждого из них, в результате чего в некоторых областях при их наложении дополнительно создаются условия, благоприятные для разрушения горной породы.

Третье — практика ведения взрывных работ [7] показала, что расположение врубового ряда вторым или третьим от тыльной части взрываемого блока (взрывание в зажиме), исключает выброс горной массы за пределы блока за счёт подвижки разрушаемого массива в сторону взорванной горной массы врубового ряда. Практически отсутствует развал горной массы — весь объем взорванной породы располагается в контурах блока.

### **Методы**

Начальная стадия разрушения, когда происходит нарушение связей, развитие микродефектов, изменяющих прочностные свойств и состояние горных пород взрываемого блока, характеризуется как состояние предразрушения [12]. Однако в современных методиках проектирования параметров буровзрывных работ (БВР) процесс предразрушения, связанный со временем развития трещин, практически не учитывается [13]. Интенсификация предразрушения горных пород в процессе развития массового взрыва увеличением интервалов замедления является резервом снижения энергоемкости разрушения и повышения качества дробления. Оптимизация взаимодействия волновых процессов в зоне предразрушения при развитии массового взрыва позволяет управлять изменениями прочностных свойств горных пород за счет развития микротрещин, что актуально не столько при их взрывном дроблении, а, что существенно важнее, — при тонкой дезинтеграции на мельницах обогатительных фабрик [14].

## Результаты

Рассмотрим влияние интервалов замедления на качество дробления пород взрывом на примере экспериментального массового взрыва на одном из карьеров золотодобычи на Дальнем Востоке. Блок № 3 объемом 77662 м<sup>3</sup> горной массы, взорванный 29.05.2021 г. на горизонте +710 — +700 м, обурен 233 скважинами диаметром 215 мм глубиной 11,0 м, расположенными в 8 рядов по сетке 6×6 м. Масса заряда ВВ Нитронит Э-70 в скважине составила 350,75 кг, удельный расход ВВ — 1,05 кг/м<sup>3</sup>, промежуточные детонаторы ПТ-П750. Монтаж взрывной сети выполнен волноводной системой Rionel, схема — последовательная в ряду, с замедлением между рядами 150 мс, т. е. вдоль ряда замедление формируется за счет времени срабатывания волновода. Результаты массового взрыва блока № 3 по такой схеме взрывания были признаны неудовлетворительными: пройденная экскаватором первая заходка показала неприемлемый выход негабарита очень крупных размеров, а далее выявилась стена практически неразрушенной породы. Выемка была прекращена, блок повторно обурен и взорван по схеме 400×200 мс, после чего отработан с обычными показателями выемки для таких схем взрывания.

Выполнен графический анализ развития массового взрыва блока № 3 по двум показателям: количеству волн напряжения, прошедших через районы расположения скважинных зарядов до их взрыва, и энергетическим показателям преломления и отражения волн напряжений от экранирующей поверхности горной массы ранее взорванных зарядов. Учитывали срабатывание волновода со скоростью 2000 м/с, что равнозначно удельному замедлению 2 мс/м. При межскважинном рассто-

янии 6 м и глубине установки скважинного промежуточного детонатора 10 м общая длина волновода составит 16 м, следовательно, замедление между последовательными взрывами зарядов в вертикальном ряду составит, в среднем, 8 мс. Замедление врубовых зарядов каждого следующего вертикального ряда выполняли поверхностным детонатором с номиналом 150 мс, следовательно, порядную схему данного блока можно считать схемой взрывания 150×8 мс. При построении графической модели для анализа развития массового взрыва приняты следующие условия: заводские параметры срабатывания поверхностных и скважинных детонаторов без учета отклонений от номинала; горная порода, разрушенная предыдущими скважинными зарядами за 75 мс и ранее, является экранирующей средой, отражающей от своей поверхности около трети энергии волн напряжения обратно во взрываемый объем с преломлением остальной энергии в разрушенную породу [11]; район расположения любого скважинного заряда зоны предразрушения подвержен действию всех волн напряжения, независимо от направления их прихода — это обуславливает знакопеременность и разнонаправленность воздействий; скорость роста трещин  $C_{тр}$  принята 74 м/с по данным работы [15], скорость волны напряжений в массиве горных пород карьера —  $C_p = 560$  м/с по данным работы [7], а соотношение  $C_{тр}/C_p = 0,132$  вполне соответствует данным работы [16, с. 215] о скорости роста трещин в 10–13 % от скорости волны напряжения в массиве горных пород.

Известно, что энергия взрыва скважинного заряда способна производить дробление горных пород в зоне разрушения размером до 40 радиусов заряда ( $R_{зар}$ ) и предразрушение в массиве

горных пород в зоне размером до 250  $R_{зар}$  [8]. Для построения графической модели развития взрыва приняты максимальные размеры радиусов: разрушения — 4,3 м, предразрушения — 26,7 м. Радиус зоны предразрушения при этих условиях перекрывает размер сетки скважин четырехкратно.

На рис. 1, где представлена графическая модель развития массового взрыва на блоке № 3 по двум схемам взрывания: 150×8 мс и 400×200 мс, видно, что качественные показатели воздействия волн напряжений на массив существенно выше у схемы взрывания 150×8 мс: максимальное число прошедших волн (34) выше на 13%, а количество таких зарядов в ряду вдвое выше (4 против 2). Следовательно, при схеме взрывания 150×8 мс нарушенность массива должна быть выше схемы 400×200 мс ввиду большего числа воздействий волн напряжений, но фактического влияния на итоговый резуль-

тат разрушения это не оказало. Ответ на неудовлетворительное дробление пород по схеме 150×8 мс следует искать в механизме взаимодействия каждого взрываемого заряда с экранирующей поверхностью ранее взорванной горной массы в процессе развития массового взрыва [17].

На рис. 2 приведены результаты графического моделирования динамики развития зоны дробления каждого заряда схемы взрывания 150×8 мс с шагом в 1 мс, исходя из последнего пункта условий моделирования: шаг прироста размеров зоны дробления составит 0,074 м/мс, а зоны предразрушения — 0,56 м/мс. Снижение энергетических параметров волны напряжения по мере ее перемещения по массиву горных пород условно отражено уменьшением толщины внешней окружности.

На графической модели к 11-й мс от начала массового взрыва зона дро-

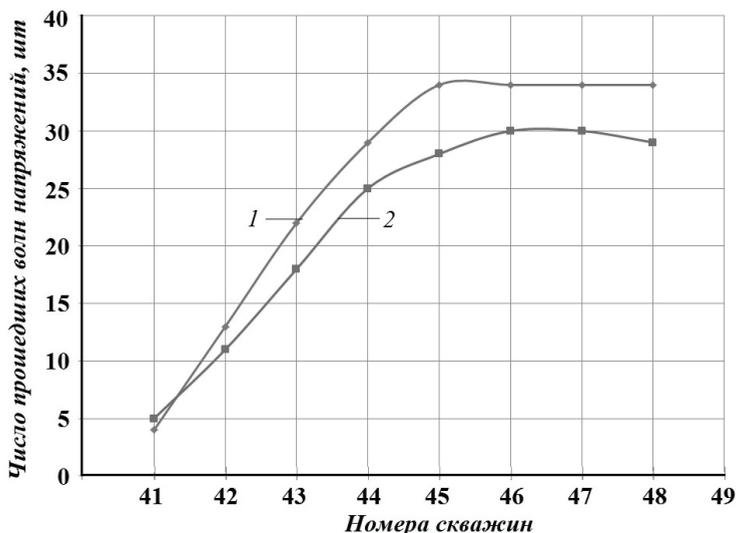


Рис. 1. Число прошедших волн напряжений по 6-му ряду скважинных зарядов при последовательной схеме 150×8 мс (1) и по схеме 400×200 мс (2)

Fig. 1. The number of passed stress waves along the 6th row of borehole charges with according to the sequential scheme 150×8 ms (1) and according to the scheme 400×200 ms (2)

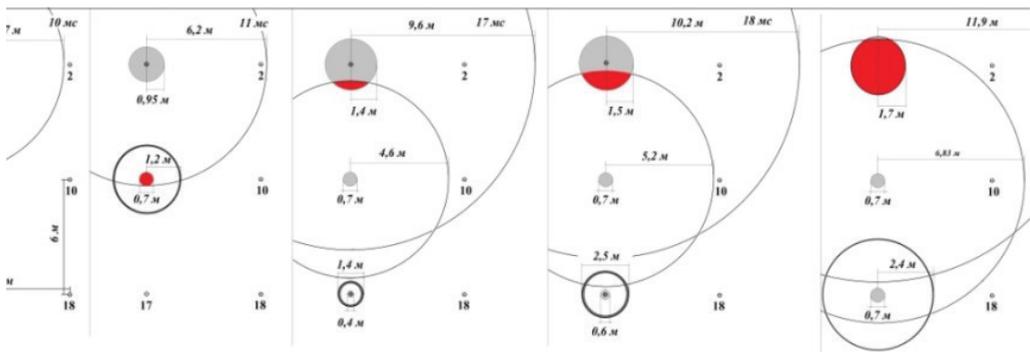


Рис. 2. Графическая модель динамики развития массового взрыва блока № 3 со схемой взрывания 150×8 мс

Fig. 2. A graphical model of the dynamics of the development of a mass explosion of block No. 3 with an explosion scheme of 150×8 ms

блениа, сформированная зарядом 9, полностью перекрывается волной напряжения от заряда 1, и ее дальнейший рост прекращается. Основанием для такого вывода служат данные работы [18], где физическим моделированием развития трещины в блоке из полиметилметакрилата со скоростью продольной волны  $C_p = 2320$  м/с и скоростью роста трещины 138 м/с (0,06  $C_p$ ) установлено, что воздействие слабых волн напряжения от внешних взрывов лишь изменяет траекторию, но не задерживает рост трещин. А вот сильная волна напряжений, перпендикулярная плоскости трещины, полностью прекращает ее рост.

Следует обратить внимание на следующий фактор: на 17-й мс видно, что волна напряжения от заряда 9 в стадии сжатия перемещается в противофазе по зоне растяжения от заряда 1, что неизбежно приведет к остановке роста микротрещин в зоне предразрушения. Этот вопрос требует отдельного внимательного рассмотрения.

Волна напряжений при распространении по массиву горных пород взрываемого блока осуществляет предварительное разрушение окрестностей окружающих скважин. Величина

деформации (предразрушения) окрестностей этих скважин определяется по формуле [19]:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{np} K_{\text{и}} = \varepsilon_{np} \left(\frac{r}{R_i}\right)^2, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_i$  — величина деформации окрестностей  $i$ -той скважины;  $K_{\text{и}}$  — коэффициент интенсивности предразрушения, учитывающий изменение величины деформации по мере удаления от оси взрываемой скважины;  $r$  — радиус зоны разрушения скважины;  $R_i$  — расстояние между осями  $i$ -той и взрываемой скважин.

При достижении предельной деформации взрывной полости скважины  $\varepsilon_{\text{пр}}$ , когда порода в ней полностью разрушена,  $K_{\text{и}} = 1$ . Радиус зоны разрушения скважины является косвенным выражением мощности заряда ВВ взрываемой скважины.

Расчеты для сетки 6×6 м при  $r = 4,3$  м в момент достижения волной напряжения от заряда 1 зоны разрушения заряда 9 (11 мс на рис. 2) показали величину  $K_{\text{и}} = 0,59$ , что позволяет считать волну напряжений в районе соседней скважины сильной, способной прекратить дальнейшее формирование зоны

разрушения. В работе [20] математическим моделированием установлено, что трещина на стадии растяжения в волне напряжения растет лишь в случае превышения поступающей в вершину трещины энергии взрыва над энергией сжатия окружающей среды. Поэтому все последующие взрываеемые заряды вдоль вертикального ряда будут иметь такую же зону разрушения диаметром 0,7 м. А вот у первых зарядов вертикальных рядов, расположенных вдоль вруба, зона разрушения формируется дольше. Волна напряжения от заряда 9 достигает зоны разрушения заряда 1 только к 17 мс, а приостановка роста этой зоны происходит за 5 этапов — с 17 по 21 мс: формируется зона квазиэллиптической формы размером 3,4×3,1 м с большей осью вдоль вертикального ряда (см. рис. 2, 21 мс).

Взрывание в зажиме взорванной горной массой по внешнему контуру разрушения позволяет изменить параметры отраженных волн напряжения и перераспределить кинетическую энергию выброса на энергию дробления. Преломленные в разрушенную среду волны напряжения дополнительно повышают степень ее дробления за счет достаточной сжимаемости разрушенных пород, чем достигается качественное дробление при одновременном перераспределении кинетической энергии выброса на дробление пород [11, с.177]. При этом экранирующая поверхность должна быть как можно ближе, чтобы фронты поперечной и продольной волн от взорванного заряда не успели разойтись, поскольку эти волны по-разному поглощаются разрушенной породой, и экран, расположенный на значительном расстоянии, волны огибают без существенных изменений [11, с.183].

При замедлении вдоль ряда в 8 мс экранирующая поверхность зоны раз-

рушения у первого взорванного заряда возникает только в момент взрыва 10-го заряда, когда между ними расстояние составляет 60 м ( $560 R_{\text{зар}}$ ), поэтому взаимодействие волн напряжения с отражающей поверхностью ранее взорванной горной массы возможно лишь при срабатывании зарядов второго вертикального ряда. При взрыве скважинного заряда 2 на ступени замедления 150 мс (рис. 3, а) на зону разрушения заряда 1 действует 9% энергии волны напряжения ( $33/360$ ), причем величина коэффициента  $K_{и}$ , учитывающего изменение величины деформации по мере удаления от оси взрываеваемой скважины, составит:

$$K_{и2-1} = \left( \frac{r}{R} \right)^2 = \left( \frac{4,3}{4,45} \right)^2 = 0,81,$$

где — принятый для расчета радиус зоны разрушения горных пород, 4,3 м; — расстояние до экранирующей поверхности горной породы, разрушенной зарядом 1 150 мс ранее (экранирующая поверхность возникла 75 мс назад); с учетом доли энергии волны напряжений на эту зону разрушения, получим:  $K_{и2-1} = 0,81 \times 0,09 = 0,073$ , а результирующий итог:  $K_{и2-1} = 0,073 \times 0,7 = 0,051$ .

Аналогичным образом произведен подсчет энергетических воздействий волн напряжений на разрушенную ранее горную массу от взрывов других зарядов для схем взрывания, приведенных на рис. 3. Результаты представлены в таблице.

Суммарные величины преломленной энергии волн напряжений в ранее взорванную горную массу, выраженные через  $K_{и}$ , приведены на рис. 4.

#### Выводы

Выполненный графический анализ результатов экспериментального

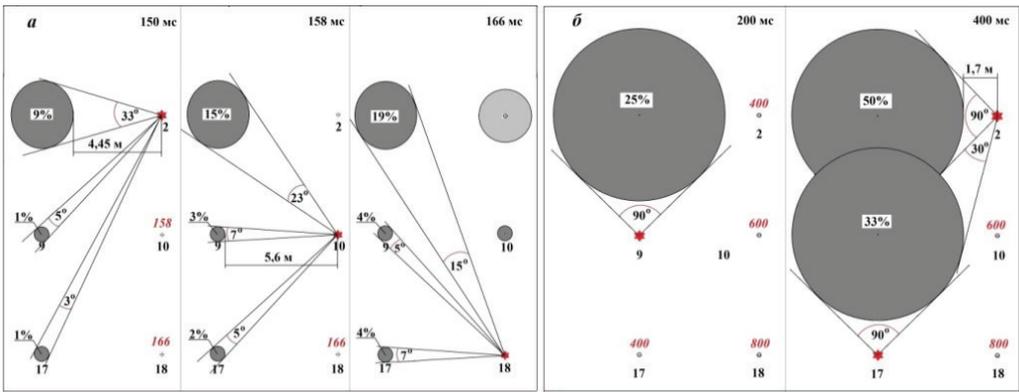


Рис. 3. Графическая модель взаимодействия взрывааемых зарядов с экранирующими поверхностями при схемах взрывания: 150×8 мс (а) и 400×200 мс (б)  
 Fig. 3. A graphical model of the interaction of exploding charges with shielding surfaces in explosion schemes: 150×8 ms (a) and 400×200 ms (b)

Таблица

Энергия волн напряжения зарядов, выраженная через  $K_{II}$   
 The energy of the charge voltage waves, expressed in terms of  $K_{II}$

Взрыва- емый заряд	Доля энергии волн напряжений взорванных зарядов, преломленной в экранирующую горную массу (коэффициент 0,7)						
	зоны разрушения от ранее взорванных зарядов						
	схема взрывания 150×8 мс			схема взрывания 400×200 мс			
	1	9	17	1	2	9	17
2	0,051	0,005	0,0006	1,12		0,06	
9				1,12			
10	0,016	0,008	0,002		1,12	1,12	0,06
17						1,12	
18	0,0036	0,0027	0,008				
25							1,12
26		0,0006	0,005				
Итого	0,07	0,016	0,016	2,24	1,12	2,30	1,18

массового взрыва по схеме взрывания 150×8 мс и варианта применения в этих условиях схемы взрывания 400×200 мс позволил сделать следующие выводы.

Порядные схемы взрывания неэлектрическими волноводными системами не обеспечивают достижения теоретически возможных размеров зон разрушения скважинных зарядов из-за быстрого прекращения развития трещин в зоне разрушения под воздействием волн напряжений с высокой энергией

от взрыва соседних зарядов. Минимальные размеры зон разрушения и их удаленность от соседних зарядов практически сводят на нет использование преломленной энергии волн напряжений для интенсификации процессов вторичного воздействия на горную массу.

Поскважинное взрывание по схеме 400×200 мс обеспечивает максимальное использование энергии взрыва каждого заряда степени замедления на дробление горной породы за счет

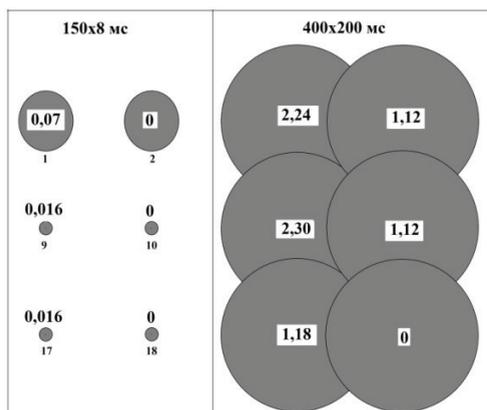


Рис. 4. Сводные результаты графического моделирования взаимодействия волн напряжений с экранирующей поверхностью ранее взорванной горной массы

Fig. 4. Summary results of graphical modeling of the interaction of stress waves with the shielding surface of a previously exploded rock mass

перевода энергии разброса кусков породы в энергию дробления в условиях зажима природным массивом. Увеличивается энергия разрушения взрывающего заряда за счет отражения в зону его действия от экранирующей

поверхности ранее взорванной горной массы волны напряжения в самой эффективной форме волны растяжения, накладывающейся на хвостовую часть волны напряжения взрывающего заряда. Преломленная в ранее взорванную горную массу энергия волн напряжений от соседних взорванных зарядов практически на два порядка выше, чем при порядной схеме, чем и обусловлено высокое качество дробления пород и проработки подошвы уступа при полном отсутствии негабарита. Следовательно, главным фактором, обеспечивающим высокое качество дробления горной массы при больших интервалах замедления, является использование разрушенных зон ранее взорванных зарядов, расположенных практически вплотную, в виде идеальной отражающей поверхности. Однако взрыв следующего заряда (с учётом отклонения замедлителей от номинала) необходимо выполнять не ранее чем через 100 мс, чтобы эта поверхность успела сформироваться.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang J., Yang S.-Q., Tian W.-L., Mu Z.-L. Experimental investigation of microscopic crack development and damage characteristics of sandstone based on acoustic emission characteristic parameters // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2022. Т. 8. № 2. Article №: 51. DOI: 10.1007/s40948-022-00361-x.
2. 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204166>.
3. Cui J., Xie L., Qiao W., Qiu L., Hu Z., Wu L. Study on blasting characteristics of rock mass with weak interlayer based on energy field // *Scientific Reports*. 2022. Т. 12. № 1. pp. 1–15. DOI:10.1038/s41598-022-7028-y.
4. Chenxi Ding, Renshu Yang, Chun Feng. Stress wave superposition effect and crack initiation mechanism between two adjacent boreholes // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2021. 138. pp. 104–122.
5. Bhagade N. V., Murthy V. M. S. R., Ali M. S. Enhancing rock fragmentation in dragline bench blasts using near-field ground vibration dynamics and advanced blast design // *Powder Technology*. 2021. 381. pp. 421–439.
6. Ермолаев А. И., Мурзинов И. М., Лапшов А. А. Проблемы в теории разрушения горных пород энергией взрыва // *Известия вузов. Горный журнал*. — 2007. — № 2. — С. 78–85.
7. 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. — 2015. — № 4. — С. 341–348.

8. Shevkun E., Leshchinsky A., Plotnikov A. Special aspects of ex-plosive loosening with minimal rock displacement // E3S Web of Conferences. 2020. 192. 01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201003>.

9. Hino K. Fragmentation of rock through blasting and shock waves, theory of blasting Quarterly of the Colorado School of Mines, Golden, 1956, 51. pp. 189–209.

10. Андриевский А. П. Физико-техническое обоснование параметров разрушения горного массива взрывом удлиненных зарядов: автореф. дисс... д.т.н. — Новосибирск, 2009. — 38 с.

11. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М., Недра. — 1976. — 271 с.

12. Казаков Н. Н. Взрывная отбойка руд скважинными зарядами. — М., Недра, 1975. — 192 с.

13. Волченко Г. Н., Фрянов В. Н., Серяков В. М. Исследование влияния предразрушения горных пород на снижение энергоемкости взрывного дробления // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2011. № 1. С. 19–31.

14. Лещинский А. В., Шевкун Е. Б., Лысак Ю. А. Влияние направления инициирования зарядов взрывчатых веществ на предразрушение массива скальных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 2. — С. 50–57.

15. Лапшов А. А. Оптимизация интервалов замедлений при массовых взрывах на карьерах: автореф. дис... к.т.н. — Екатеринбург, 2011. — 18 с.

16. Барон В. Л., Кантор В. Х. Техника и технология взрывных работ в США. — М.: Недра, 1989. — 376 с.

17. Sher E. N. Modeling rock destruction under blasting of closely spaced borehole charges // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. С. 012069.

DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012069.

18. Peng Qiu, Zhongwen Yue, Renshu Yang. Experimental study on mode-I and mixed-mode crack propagation under tangentially incident P waves, S waves and reflected waves in blasts // Engineering Fracture Mechanics 247 (2021) 107664. 17 p.

19. Штукарин Н. Г. Физика взрыва в прикладных задачах. — Красноярск: Ситам, 2010. — 309 с.

20. Каркашадзе Г. Г., Ларионов П. В., Мишин П. Н. Моделирование роста трещины под действием циклической нагрузки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 3. — С. 258–262. **ПЛАБ**

## REFERENCES

1. Yang J., Yang S.-Q., Tian W.-L., Mu Z.-L. Experimental investigation of microscopic crack development and damage characteristics of sandstone based on acoustic emission characteristic parameters. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2022. T. 8. no. 2. Article number: 51. DOI: 10.1007/s40948-022-00361-x.

2. 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204166>.

3. Cui J., Xie L., Qiao W., Qiu L., Hu Z., Wu L. Study on blasting characteristics of rock mass with weak interlayer based on energy field. *Scientific Reports*. 2022. T. 12. no. 1. pp. 1–15. DOI:10.1038/s41598-022-7028-y.

4. Chenxi D., Renshu Y., Chun F. Stress wave superposition effect and crack initiation mechanism between two adjacent boreholes. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2021. 138. pp. 104–122.

5. Bhagade N. V., Murthy V. M. S. R., Ali M. S. Enhancing rock fragmentation in dragline bench blasts using near-field ground vibration dynamics and advanced blast design. *Powder Technology*. 2021. 381. pp. 421–439.

6. Ermolaev A. I., Murzikov I. M., Lapshov A. A. Problems in the theory of destruction of rocks by explosion energy. *Minerals and Mining Engineering*. 2007. no. 2. P. 78–85. [In Russ].

7. Mityushkin A., Lysak Y. A., Plotnikov A. Y., Ruzhitsky A. V., Shevkun E. B., Leshchinsky A. V. Optimization of blasting parameters by increasing the deceleration intervals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015. no. 4. Pp. 341–348. [In Russ].

8. Shevkun E., Leshchinsky A., Plotnikov A. Special aspects of explosive loosening with minimal rock displacement. *E3S Web of Conferences*. 2020. 192, 01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201003>.

9. Hino K. Fragmentation of rock through blasting and shock waves, theory of blasting Quarterly of the Colorado School of Mines, Golden, 1956, 51. Pp. 189–209.

10. Andrievsky A. P. Physico-technical substantiation of the parameters of destruction of the mountain range by the explosion of elongated charges: autoref. diss... Doctor of Technical Sciences. Novosibirsk, 2009. 38 p. [In Russ].

11. Mosinets V. N. Crushing and seismic effect of explosion in rocks. M.: Nedra, 1976. 271 p. [In Russ].

12. Kazakov N. N. Explosive breakage of ores by borehole charges. M.: Nedra, 1975. 192 p. [In Russ].

13. Volchenko G. N., Fryanov V. N., Seryakov V. M. Investigation of the influence of pre-destruction of rocks on reducing the energy intensity of explosive crushing. *Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry*. 2011. no. 1. Pp. 19–31. [In Russ].

14. Leshchinsky A. V., Shevkun E. B., Lysak Yu. A. Influence of the direction of initiation of explosive charges on the pre-destruction of the rock massif. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. no. 2. Pp. 50–57. [In Russ].

15. Lapshov A. A. Optimization of deceleration intervals during mass explosions in quarries: autoref. dis... Ph.D. Ekaterinburg, 2011. 18 p. [In Russ].

16. Baron V. L., Kantor V. H. Technique and technology of blasting operations in the United States. Moscow: Nedra, 1989. 376 p. [In Russ].

17. Sher E. N. Modeling rock destruction under blasting of closely spaced borehole charges. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. C. 012069. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012069.

18. Peng Q., Zhongwen Yu., Renshu Y. Experimental study on mode-I and mixed-mode crack propagation under tangentially incident P waves, S waves and reflected waves in blasts. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021. 247. 107664. 17 p.

19. Shtukarin N. G. Physics of explosion in applied problems. Krasnoyarsk: Sitam, 2010. 309 p. [In Russ].

20. Karkashadze G. G., Larionov P. V., Mishin P. N. Modeling of crack growth under the action of cyclic load. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011. no. 3. Pp. 258–262. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Шевкун Евгений Борисович* — докт. техн. наук, профессор, Тихоокеанский государственный университет, e-mail: [ev.shevkun@yandex.ru](mailto:ev.shevkun@yandex.ru), orcid: 0000-0001-9002-4943;  
*Плотников Андрей Юрьевич* — канд. техн. наук, ООО «АВТ-Амур», г. Благовещенск, ул. Амурская, д. 17, e-mail: [plotnikov1960@hotmail.com](mailto:plotnikov1960@hotmail.com).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Shevkun E. B.*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Pasific Nacional Universiti, e-mail: [ev.shevkun@yandex.ru](mailto:ev.shevkun@yandex.ru), orcid: 0000-0001-9002-4943;  
*Plotnikov A. Yu.* Cand. Sci (Eng), “AVT-Amur”, Blagoveshchensk, 17, Amur St., e-mail: [plotnikov1960@hotmail.com](mailto:plotnikov1960@hotmail.com).

Получена редакцией 05.10.2023; получена после рецензии 27.10.2023; принята к печати 10.11.2023.  
Received by the editors 05.10.2023; received after the review 27.10.2023; accepted for printing 10.11.2023.

