



## РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-187>

УДК 622.235



## Теоретические аспекты технологии взрывной отбойки блочного камня

В. Н. Ковалевский  , А. В. Мысин  , В. И. Сушкова   ✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ [s235054@stud.spmi.ru](mailto:s235054@stud.spmi.ru)

## Аннотация

Добыча блочного камня является ключевым аспектом индустрии строительных материалов, важным для обеспечения строительства прочными материалами и при придании эстетических решений различным конструкциям и элементам дизайна. Однако при добыче камня (производстве буровзрывных работ) необходимо сохранить его целостность для последующей обработки и использования. В рамках исследования были рассмотрены условия, необходимые для применения технологии взрывной отбойки блочного камня из скальных горных пород, что актуально для повышения качества отбиваемых камнеблоков. Приведены рациональные параметры взрывной отбойки камнеблоков зарядами эластичными трубчатými (ЗЭТ) «Гранилен». Определен подход к предварительной оценке зоны нарушенности блочного камня при различных режимах взрывного нагружения. Рассмотрена взаимосвязь между расходом взрывчатых веществ (ВВ) и нарушенностью камнеблоков при возможных расстояниях между шпурами. Исследован механизм создания протяженной плоскости разрыва в массиве горных пород. Установлена определяющая роль волн напряжений при формировании протяженной магистральной трещины по линии шпуровых зарядов. Показана возможность локализации зоны наведенной трещиноватости за счет регулирования условий взаимодействия волн напряжений. Приведены результаты численного моделирования полей напряжений при взрыве одиночных и системы из двух зарядов ЗЭТ «Гранилен», что позволило оценить зоны наведенной трещиноватости и условий формирования магистральной трещины отрыва. Эффективность взрывной отбойки значительно возрастает за счет ориентации линии предполагаемого отрыва монолита параллельно плоскости наилучшего раскола, учитывая при этом анизотропию физико-механических свойств гранитов. Исследование подтверждает возможности повышения выхода товарных блоков при подборе рациональных параметров взрывной отбойки.

## Ключевые слова

блочный массив, параметры буровзрывных работ, направленный расход, конструкция заряда, импульс взрыва, давление продукта взрыва, эпюры напряжений, динамический предел прочности, шероховатость, наведенная трещиноватость

## Для цитирования

Kovalevsky V. N., Mysyn A. V., Sushkova V. I. Theoretical aspects of block stone blasting method. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):97–104. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-187>

## MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research paper

## Theoretical aspects of block stone blasting method

V. N. Kovalevsky  , A. V. Mysyn  , V. I. Sushkova   ✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ [s235054@stud.spmi.ru](mailto:s235054@stud.spmi.ru)

## Abstract

Block stone excavation is a key aspect of the building materials industry, important for providing construction with durable materials and when giving aesthetic solutions to various structures and design elements. However, when excavating stone (using drilling and blasting), it is necessary to maintain its integrity for further processing and use. The conditions required for applying the method of blasting separation (split off) of stone blocks from hard rock mass were considered, which is important for improving the quality of blasted stone blocks. The rational parameters of stone block blasting with Granilen elastic tubular charges (Granilen ETCs) are presented. An approach to the preliminary assessment of stone block fracturing zone under various explosive loading regimes was determined. The relationship between the consumption of explosives and fracturing of stone blocks at possible blasthole spacing was considered. The mechanism of creating an extended rupture plane in a rock mass was studied. The decisive role of stress waves in the formation of an extended main rupture along the line of blasthole charges was established. It was shown that it is possible to localize the zone of induced fracturing by regulating the conditions for the interaction of stress waves. The results of numerical modeling of stress fields at blasting a single charge and a two-charge Granilen ETC system are presented, which made it possible to assess zones of induced fracturing and the conditions



for the formation of a main rupture. Blasting effectiveness increases significantly due to the orientation of the expected stone block separation line parallel to the plane of the best rupture, taking into account the anisotropy of the physical and mechanical properties of granites. The study confirms the feasibility of increasing the yield of commodity blocks when selecting rational blasting parameters.

### Keywords

block rock mass, drilling and blasting parameters, directed flow, charge design, blast pulse, blast product pressure, stress diagrams, dynamic strength limit, roughness, induced fracturing

### For citation

Kovalevsky V.N., Mysin A.V., Sushkova V.I. Theoretical aspects of block stone blasting method. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):97–104. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-187>

## Введение

Добыча блочного камня является ключевым аспектом индустрии строительных материалов, важным для обеспечения строительства прочными материалами и при придании эстетических решений различным конструкциям и элементам дизайна. Однако при добыче камня (производстве буровзрывных работ) необходимо сохранить его целостность для последующей обработки и использования [1].

Некоторым месторождениям присуща высокая переменчивость физико-механических свойств на различных участках карьерного поля.

Природными отдельностями месторождений природного камня определяются объемы добываемых блоков и их выход из разрабатываемого массива [2]. Они обусловлены расстояниями между существующими трещинами, которые на гранитных массивах колеблются в широких пределах [3].

Выбор технологической схемы по отбойке монолитов определяется структурой массива, петрографическими особенностями, геометрическими размерами полезной толщины [4].

В связи с чем буровзрывная технология при разработке месторождений блочного камня остается востребованной и в настоящее время [5].

Как показывают исследования [6–8], основными параметрами буровзрывных работ при отделении камнеблоков от массива являются диаметр шпура, расстояние между шпурами, их глубина, мощность отделяемого монолита, тип заряда, его конструкция, масса, диаметр.

Выбор оптимального расстояния между шпурами зависит как от физико-механических свойств породы, так и от начальных параметров импульса взрыва: амплитуды начального давления во взрывной камере и длительности действия на квазистатической стадии, необходимых для формирования и роста магистральной трещины между шпурами, а также для обеспечения подвижки монолита [9].

При этом условия взрывания должны обеспечивать создание трещины в плоскости откола при минимальных нарушениях околошпурового пространства [10].

Для обеспечения процесса направленного трещинообразования необходимо, чтобы давление продуктов взрыва было бы больше величины критического растягивающего напряжения горной породы, а для сохранения законтурного массива требуется, чтобы давление продуктов взрыва в шпуре не превышало предела прочности на сжатие [11]. Эти условия достигаются выбором рационального расстояния между шпурами

и оптимальных параметров импульса взрыва [12, 13]. В частности, применение зарядов ЗЭТ «Гранилен» в полной мере позволяет выполнить эти требования [14].

Реализация направленного разрушения возможна при условии, когда давление газообразных продуктов в шпуре превышает величину динамического предела прочности породы на отрыв и сохранность массива в околошпуровой зоне требует не превышения этого давления над пределом прочности пород на сжатие [15–17].

Результаты исследований, представленные в работах [18, 19], свидетельствуют, что увеличение радиального воздушного зазора по отношению к радиусу заряда в 3–4 раза обеспечивает превалирующую роль в направленном разрушении квазистатическому давлению продуктов взрыва. Поэтому весьма эффективным способом управления интенсивностью волнового и квазистатического поля напряжений может служить регулирование объемной концентрации энергии заряда взрывчатых веществ (ВВ) в шпуре [20].

Применение зарядов ЗЭТ «Гранилен» предполагает реализацию вышеизложенных условий. Конструкция зарядов ЗЭТ «Гранилен» предусматривает возможность регулирования силовых и временных параметров взрывного импульса за счет изменения массы заряда в шпуре, его длины, использования зазора между зарядом и стенкой шпура, применения забойки, варьирования расстояния между шпурами.

Обоснованное рациональное значение параметров шпуровых зарядов позволяет обеспечивать минимальную шероховатость граней отбиваемого монолита и незначительную наведенную трещиноватость в околошпуровой зоне.

## Методы и материалы

Как правило, отделение монолита от массива происходит при срабатывании близко расположенных шпуровых зарядов при их инициировании одновременно с помощью детонирующего шнура. В этом случае порода в плоскости расположения зарядов в контурных шпурах будет подвергаться в основном действию растягивающих напряжений [21–23].

Следовательно, для отрыва блока и его перемещения на величину 0,15–0,3 м [24] необходимо выполнение следующих условий:

$$F \geq F_1 + F_2 + F_3, \quad (1)$$

где  $F$  – сила, вызывающая отделение и сдвигание монолита, Па;  $F_1$  – сила, приводящая к отрыву монолита



от массива по площади  $S$  ( $S = BH_{уст}$ ), Па, где  $B$  – длина монолита, м;  $H_{уст}$  – высота уступа, м;  $F_2$  – сила трения, Па;  $F_3$  – сила, позволяющая учитывать угол падения пласта, Па.

Тогда

$$F = P_{п.д} N d_{шп} L_{шп}, \quad (2)$$

где  $P_{п.д}$  – давление газообразных продуктов взрыва в шпуре, Па;  $N$  – число шпуров в ряду, шт.;  $d_{шп}$  – диаметр шпура, м;  $L_{шп}$  – глубина шпура, м;

$$F_1 = \sigma_p^d (BH_{уст} - Nd_{шп}L_{шп}), \quad (3)$$

где  $\sigma_p^d$  – динамический предел прочности на растяжение, Па;

$$\sigma_p^d = K_{oc} \cdot K_o \cdot K_d \cdot [\sigma_p^d], \quad (4)$$

где  $K_{oc}$  – коэффициент структурного ослабления массива,  $K_{oc} = 0,2-0,4$ ;

$$K_o \approx \left( \frac{C_p}{C_{p.м}} \right)^2;$$

$K_d$  – коэффициент динамичности (для гранитов  $4-5,7$ )<sup>1</sup>;  $K_o$  – акустический показатель трещиноватости;  $C_{p.м}$ ,  $C_p$  – скорости продольной волны в массиве и образце горной породы, м/с.

Сила, которую необходимо приложить на преодоление трения блока по подошве при его перемещении:

$$F_2 = F_{тр} = f_1 G \cos \alpha, \quad (5)$$

где  $f_1 = \operatorname{tg} \alpha$  – коэффициент трения;  $G$  – масса монолита, кг:

$$G = \rho_{гн} BH_{уст} W, \quad (6)$$

где  $\rho_{гн}$  – плотность горной массы, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – линия наименьшего сопротивления, м;  $F_3$  – сила, позволяющая учитывать угол падения пласта, Па:

$$F_3 = G \sin \alpha. \quad (7)$$

Решение уравнений (1)–(7) позволяет получить выражение для расчета количества шпуров:

$$N = \frac{BH_{уст} [\sigma_p^d \rho_{гн} W (f_1 \cos a \pm \sin a)]}{d_{шп} L_{шп} (P_{п.д} + \sigma_p^d)}. \quad (8)$$

Протяженность отделяемого блока

$$B = \frac{N_{шп} + 1}{a}, \quad (9)$$

где  $a$  – расстояние между шпуровыми зарядами, м:

$$a = \frac{d_{шп} (P_{п.д} + \sigma_p^d)}{\sigma_p^d + \rho_{гн} W (f_1 \cos a \pm \sin a)}. \quad (10)$$

Выбирая тип ВВ (для нашего случая ЗЭТ «Гранилен 1,2») и используя формулу Нобля–Абеля [25], определяем массу ВВ, которую необходимо взорвать

<sup>1</sup> Дамбаев Ж. Г. Физические основы направленного разрушения горных пород и технологии шадящего взрыва при отбойке блочного камня. Автореферат дис. ... докт. техн. наук. Санкт-Петербург; 2000. 37 с.

в объеме шпура, чтобы создать требуемое давление продуктов детонации  $P_{п.д}$  (11):

$$m_{вв} = \frac{\pi P_{п.д} T_0 L_{шп} d_{шп}^2}{4 \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} n (P_0 T_{взр} + P_{п.д} T_0 \cdot 10^{-3})}, \quad (11)$$

где  $T_0$  – начальная температура,  $T_0 = 273$  К;  $n$  – число молей газообразных продуктов взрыва;  $T_{взр}$  – температура продуктов взрыва, К;  $P_0$  – атмосферное давление, Па,  $P_0 = 0,1$  МПа.

При взрывном отделении монолита от массива трещины и сколы камня создаются в местах, в которых возникают импульсные реакции, интенсивность которых достаточна для скола породы и которая определяется конструкцией заряда, его мощностью, местоположением в отделяемом монолите [26–28].

При наличии пластовой трещины глубина размещенного заряда (эксцентриситет) определяется из выражения

$$h = \frac{H^2 + 4W^2}{6H}, \quad (12)$$

где  $H$  – высота монолита, м;  $W$  – ширина (мощность) монолита, м.

В случае отсутствия пластовой трещины глубина размещения заряда определяется из выражения

$$h = \frac{H^2 + 4W^2 + HWf'_d}{6(H + Wf'_d)}, \quad (13)$$

где  $f_d$  и  $f'_d$  – коэффициенты динамического трения в верхней и нижней вершинах монолита. Для приближенных расчетов можно принять  $f_d = 0,25$ ;  $f'_d = 0,5$ .

Оптимальная ширина (мощность) монолита определяется из выражения

$$W = \sqrt{\left( \frac{3h_z + 6m^2}{H} \right)^2 + 16 \left( 2 - \frac{3h_z + 6m}{H} \right) - \frac{3h_z + 6m}{H}} f_d, \quad (14)$$

где  $h_z$  – высота заряда, м;  $m$  – недобур, м.

На основании приведенной методики были рассчитаны параметры буровзрывных работ для отделения монолита с использованием зарядов ЗЭТ «Гранилен-2», которые представлены в табл. 1. Наряду с определением основных параметров БВР важнейшим условием для добычи качественных камнеблоков являются точность оконтуривания отделяемого монолита и обеспечение минимального радиуса наведенной трещиноватости в околешпуровой зоне.

Значения этих отклонений определяются коэффициентом сближения зарядов, равным

$$n = \frac{a}{W}, \quad (15)$$

где  $a$  – расстояние между шпурами, м;  $W$  – ширина монолита, м.

Следовательно, минимальные величины шероховатости граней монолита могут быть достигнуты при оптимальном значении  $n$ .

В результате проведенных экспериментов на гранитных карьерах блочного камня получена зависи-

мость величины отклонения контура блоков в зависимости от расстояния между шпуровыми зарядами ЗЭТ «Гранилен-2» (рис. 1).

При низкоскоростном режиме нагружения и взаимодействии волн напряжений формируется асимметричное поле напряжений вокруг контурных шпуров, что приводит к детерминирующему росту магистральной трещины в плоскости отрыва.

Поскольку микротрещины возникают под действием импульса растягивающих напряжений, то их поверхности совпадают с радиальными плоскостями. Контурная трещина растягивается одновременно на нескольких структурных трещинах путем слияния микротрещин в макротрещины [29]. Как следствие, по линии, соединяющей соседние заряды, массив ослабляется под влиянием растягивающих напряжений по контурной линии, и между шпурами начинает расти магистральная трещина, а рост побочных трещин приостанавливается [30, 31].

Результаты работ [25, 32] свидетельствуют, что радиус зоны наведенной трещиноватости в выкалываемом монолите зависит как от величины заряда в шпурах, так и от расстояния между ними. Кинетика разрушения при направленном расколе определяется как физико-механическими свойствами горных пород, так и параметрами напряжений и давления, создаваемых продуктами взрыва в зарядной полости.

При взрыве системы цилиндрических зарядов происходит взаимодействие волн напряжений, что приводит к трансформации поля напряжений.

Приближенный метод оценки полей напряжений на основе численного моделирования и использования аналитического расчета проводился по методике, изложенной в работах для взрыва зарядов с воздушным зазором.

В качестве взрывчатого вещества принимался ЗЭТ «Гранилен-1» диаметром  $d_{зар} = 11$  мм с теплотой взрыва  $Q = 1550$  кДж/кг. Заряды располагались в шпурах  $d_{шп} = 42$  мм в гранитном массиве с плотностью породы  $\rho_{пор} = 2200$  кг/м<sup>3</sup>, скорость продольной волны  $C_p = 6200$  м/с.

Условие взаимодействия волн напряжений, обеспечивающих прорастание магистральной трещины, определялось из выражения

$$\sigma_{\phi max} \left( \frac{a}{2} \right) = \sigma_{\phi 1} \left( \frac{a}{2} \right) + \sigma_{\phi 2} \left( \frac{a}{2} \right) \geq \sigma_{отр}^{*дин}, \quad (16)$$

где  $\sigma_{\phi 1}$  и  $\sigma_{\phi 2}$  – соответственно амплитуды тангенциальной составляющей волны напряжений от взрыва соседних зарядов;  $a$  – расстояние между зарядами, м;  $\sigma_{отр}^{*дин}$  – динамический предел прочности на отрыв для гранита, Па.

Тогда [33],

$$\sigma_{отр}^{*дин} = 4\sigma_{отр}^{ст}, \quad (17)$$

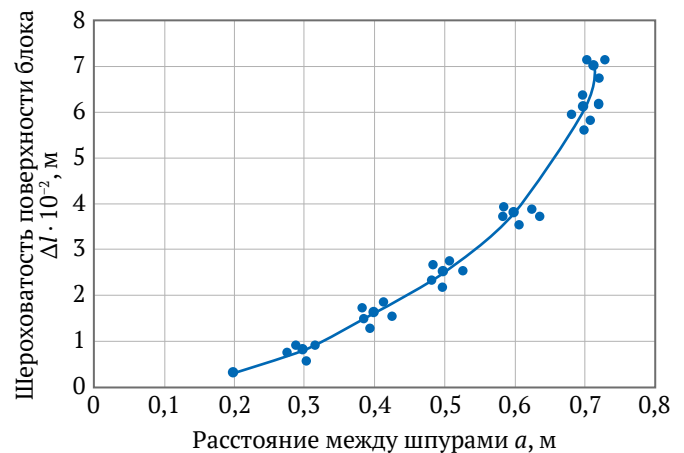
где  $\sigma_{отр}^{ст}$  – статический предел прочности на отрыв,  $\sigma_{отр}^{ст} = 9,1$  МПа,  $\sigma_{отр}^{*дин} = 36,4$  МПа.

Эта величина принималась за предельный уровень напряжений, ниже которой не происходит прорастания магистральной трещины.

Таблица 1

**Расчетные параметры БВР для выкалывания камнеблоков при наличии подошвенной трещины ( $d_{шп} = 42$  мм,  $d_{зар} = 15$  мм,  $l_{шп} = 2,9$  м)**

Наименование	Расстояние между шпурами, м			
	0,3	0,4	0,5	0,6
Масса заряда в шпуре, кг	0,27	0,36	0,45	0,54
Общий вес заряда, кг	22,4	22,7	22,5	22,7
Число шпуров	83	63	50	42
Давление в шпуре, МПа	31,0	42,5	55,5	67,0
Ожидаемый радиус наведенной трещиноватости, м	0,026	0,03	0,035	0,038
Длина заряда в шпуре, м	0,75	0,84	1,4	1,7


**Рис. 1.** Зависимость шероховатости поверхности блока от расстояния между шпурами

Длина естественной микротрещины  $l_0$  для гранитов по данным работ [33] составляла 0,01–0,03 см.

Максимальное амплитудное давление на стенки шпура для гранитов не должно превышать 90 МПа [25].

## Результаты

На рис. 2–4 представлены результаты расчета поля максимальных тангенциальных растягивающих напряжений при взрыве системы из двух зарядов ЗЭТ «Гранилен-1», расположенных на расстояниях 0,47 и 0,58 м. Заряды инициировали одновременно с помощью нити ДШЭ-12, пропущенной через канал заряда. Линейная плотность заряжения составляла 0,14 и 0,16 кг/м.

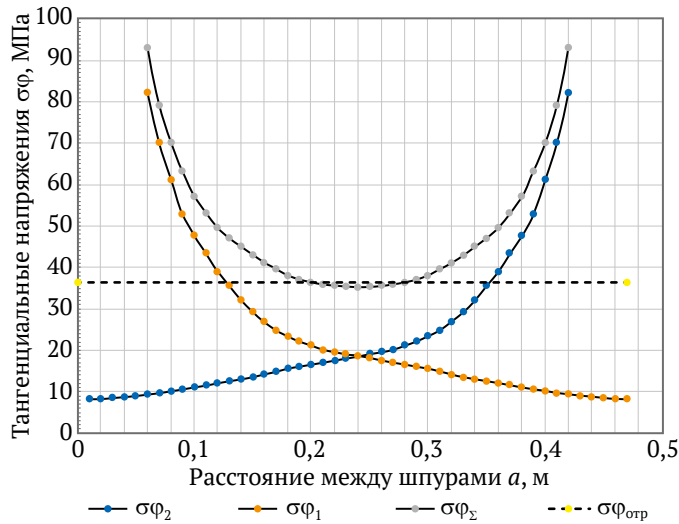
Из результатов следует, что взаимодействие одновременно взрывааемых зарядов приводит к существенному изменению поля напряжений в окрестности плоскости, проходящей через заряды.

Очевидно, что если для одиночного заряда напряжение непрерывно убывает с расстоянием, то для взаимодействующих зарядов напряжение сначала убывает с удалением от зарядов, а затем вновь увеличивается, достигая на половине расстояния между зарядами максимума. На рис. 5 представлена расчетная зависимость индивидуальных тангенциальных

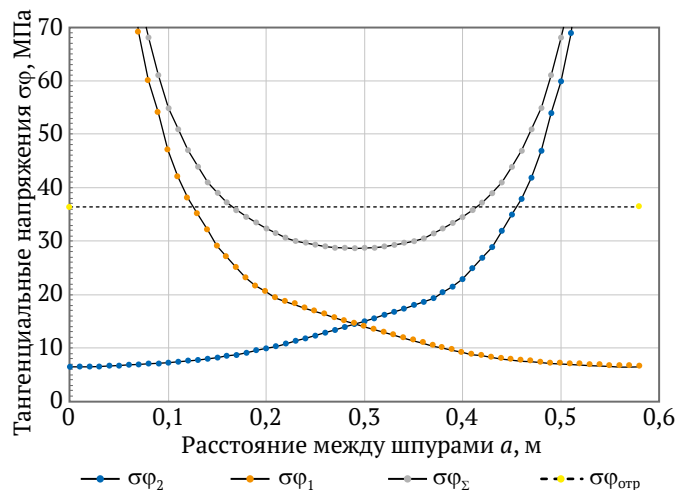
растягивающих напряжений при линейной плотности заряжения  $q$  0,14 и 0,16 кг/м и расстоянии между зарядами  $a$  0,6 м.

Приведенные на рис. 5 данные позволяют оценить возможные зоны наведенной трещиноватости вокруг шпура.

Приведенные зависимости позволяют оценить возможные зоны наведенной трещиноватости вокруг шпура при различных плотностях заряжения.



**Рис. 2.** Индивидуальные и суммарные тангенциальные напряжения при взрыве смежных зарядов ( $a = 0,47$  м,  $q = 0,14$  кг/м):  $\sigma_{\phi_1}$  и  $\sigma_{\phi_2}$  – амплитуды тангенциальной составляющей волны напряжения от первого и второго зарядов соответственно, МПа;  $\sigma_{\phi_{\Sigma}}$  – суммарная амплитуда тангенциальной составляющей волны напряжения от двух зарядов, МПа;  $\sigma_{отр}$  – предельно допустимое значение отрыва, МПа

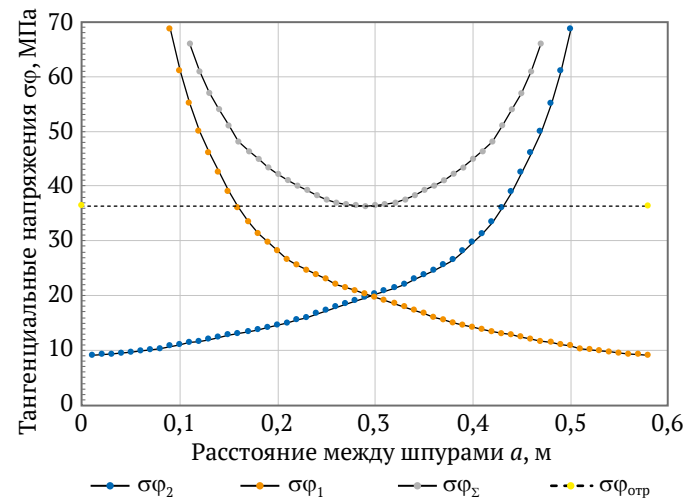


**Рис. 3.** Индивидуальные и суммарные тангенциальные напряжения при взрыве смежных зарядов ( $a = 0,58$  м,  $q = 0,14$  кг/м):  $\sigma_{\phi_1}$  и  $\sigma_{\phi_2}$  – амплитуды тангенциальной составляющей волны напряжения от первого и второго зарядов соответственно, МПа;  $\sigma_{\phi_{\Sigma}}$  – суммарная амплитуда тангенциальной составляющей волны напряжения от двух зарядов, МПа;  $\sigma_{отр}$  – предельно допустимое значение отрыва, МПа

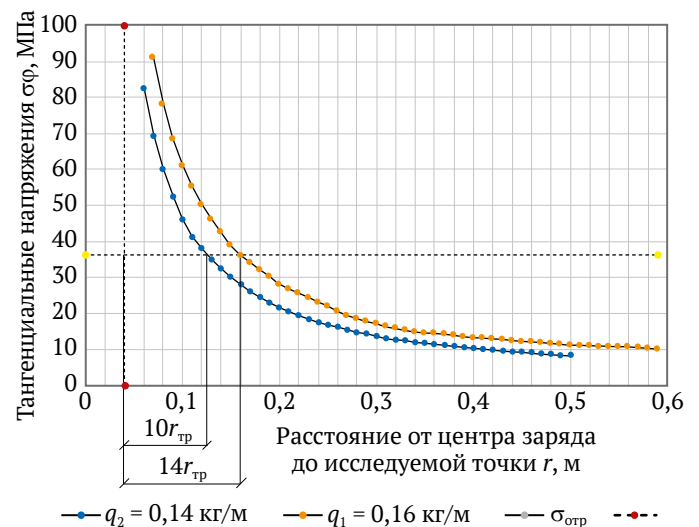
### Заключение

Установлено, что для наиболее вероятного развития радиальной магистральной трещины между шпуровыми зарядами при добыче камнеблоков необходимо использовать эффект взаимодействия волн напряжений.

Следует отметить, что для минимизации зоны наведенной трещиноватости необходимо величину заряда выбирать таким образом, чтобы поле растягивающих напряжений в плоскости раскола не превышало предела прочности на отрыв. Прорастание на магистральной трещине начинается с момента



**Рис. 4.** Индивидуальные и суммарные тангенциальные напряжения при взрыве смежных зарядов ( $a = 0,58$  м,  $q = 0,16$  кг/м):  $\sigma_{\phi_1}$  и  $\sigma_{\phi_2}$  – амплитуды тангенциальной составляющей волны напряжения от первого и второго зарядов соответственно, МПа;  $\sigma_{\phi_{\Sigma}}$  – суммарная амплитуда тангенциальной составляющей волны напряжения от двух зарядов, МПа;  $\sigma_{отр}$  – предельно допустимое значение отрыва, МПа



**Рис. 5.** Зона наведенной трещиноватости при линейных плотностях заряжения  $q_1 = 0,14$  кг/м,  $q_2 = 0,16$  кг/м:  $r_{тр}$  – радиус трещиноватости, м;  $\sigma_{отр}$  – предельно допустимое значение отрыва, МПа



прихода волны разрежения, отраженной от поверхности выкальваемого монолита.

Также можно утверждать, что с ростом среднего давления  $P_{cp}$  длина магистральной трещины убывает за счет роста числа микротрещин. Даже при максимальном значении давления на стенки шпура длина трещины от отдельного шпура такова, что с учетом возрастания коэффициента интенсивности напряжений и линейной системы трещин, прорастающих между шпурами, расстояние между ними может быть значительно больше обычно принятого.

Однако при малом значении давления (малом числе трещин) это потенциально возможное расстояние между шпурами нельзя реализовать из-за случайного направления роста трещин и, следовательно, непредсказуемости направления раскола. Поэтому необходимо увеличивать заряд (вместимость, давление в шпуре) для увеличения числа трещин с тем,

чтобы в направлении линии шпуров или вблизи их обязательно имелись трещины.

При одновременном росте величины заряда приходится сближать шпуры, чтобы достаточно рано прекратился рост трещин, идущих от шпуров во всех направлениях (что происходит, как только трещины, растущие в направлении линии шпуров, начинают «чувствовать друг друга»), и нарушенная зона вокруг шпуров была бы минимальной.

Таким образом, получение направленного раскола требует сближения шпуров и одновременно увеличения в определенных пределах шпурового заряда.

Потенциальную возможность направленного раскола при увеличенном расстоянии между шпурами со сниженными зарядами можно реализовать, используя возможные выделенные естественные направления в камне (кливаж, слоистость и т.п.), что исключает рост трещин в других направлениях.

### Список литературы / References

1. Careddu N. Dimension stones in the circular economy world. *Resources Policy*. 2019;60:243–245. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.01.012>
2. Paramonov G.P., Kovalevskiy V.N., Mysyn A.V. Determination of the conditions of an effective functioning of elongated cumulative charges in processing the marble stone. *Key Engineering Materials*. 2020;836:19–24. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.836.19>
3. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф. К расчету параметров волн напряжений при взрыве удлиненного заряда в горных породах. *Взрывное дело*. 1976;(76/38):74–85.  
Borovikov V.A., Vanyagin I.F. About calculation of parameters of stress waves when blasting an elongated charge in rocks. *Vzryvnoe Delo*. 1976;(76/38):74–85. (In Russ.)
4. Skublov S.G., Petrov D.A., Galankina O.L. et al. Th-rich zircon from a pegmatite vein hosted in the Wiborg Rapakivi Granite Massif. *Geosciences*. 2023;13(12):362. <https://doi.org/10.3390/geosciences13120362>
5. Ишейский В.А., Рядинский Д.Э., Магомедов Г.С. Повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрывающегося массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9–1):79–95. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_79](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_79)  
Ishesky V.A., Ryadinskii D.E., Magomedov G.S. Increasing the quality of fragmentation of blasting rock mass ased on accounting for structural features of massif in the blast design. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9–1):79–95. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_79](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_79)
6. Ковалев А.В. Направления совершенствования взрывной технологии добычи блочного камня в массиве с интенсивной трещиноватостью. *Горные науки и технологии*. 2018;(1):23–34. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2018-1-23-34>  
Kovalev A.V. Ways of improving blasting methods of dimensional stone quarrying in intensively fractured rock mass. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2018;(1):23–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2018-1-23-34>
7. Pal Roy P. Emerging trends in drilling and blasting technology: concerns and commitments. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14:652. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06949-z>
8. Sanchidrián J.A., García-Bermudez P., Jimeno C.L. Optimization of granite splitting by blasting using notched holes. *International Journal for Blasting and Fragmentation*. 2000;4(1):1–11. <https://doi.org/10.1080/13855140009408059>
9. Господариков А.П., Ревин И.Е., Морозов К.В. Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит». *Записки Горного института*. 2023;262:571–580. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.9>  
Gospodarikov A.P., Revin I.E., Morozov K.V. Composite model of seismic monitoring data analysis during mining operations on the example of the Kukisvumchorrskoye deposit of AO Apatit. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:571–580. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.9>
10. Барон Л.И., Турчанинов Н.А., Ключников А.В. *Нарушенность пород при контурном взрывании*. Л.: Наука; 1975. 339 с.  
Baron L.I., Turchaninov N.A., Klyuchnikov A.V. *Rock disturbance when using blasting by presplitting method*. Leningrad: Nauka Publ.; 1975. 339 p. (In Russ.)
11. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф. *Техника и технология взрывных работ*. Л.: Изд-во ЛГИ; 1985. 92 с.  
Borovikov V.A., Vanyagin I.F. *Blasting methods and technology*. Leningrad: LGI Publ. House; 1985. 92 p. (In Russ.)



12. Зырянов И.В., Бондаренко И.Ф., Ковалевич С.В., Ким С.И. Влияние взрыва скважинного заряда с радиальным зазором на качество разрушения алмазоносной руды. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5–2):58–71. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_52\\_0\\_58](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_58)  
Ziryaynov I.V., Bondarenko I.F., Kovalevich S.V., Kim S.I. Influence of the explosion of a borehole charge with a radial gap on the quality of destruction of diamond-bearing ore. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5–2):58–71. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_52\\_0\\_58](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_58)
13. Маринин М.А., Евграфов М.В., Должиков В.В. Производство взрывных работ на заданный гранулометрический состав руды в рамках концепции «mine-to-mill»: современное состояние и перспективы. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(7):65–74. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3264>  
Marinin M.A., Evgrafov M.V., Dolzhikov V.V. Production of blasting operations for a given granulometric composition of ore within the framework of the «mine-to-mill» concept: current state and prospects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(7):65–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3264>
14. Saadati M., Forquin P., Weddfelt K. et al. On the mechanical behavior of granite material with particular emphasis on the influence from pre-existing cracks and defects. *Journal of Testing and Evaluation*. 2018;46:33–45. <https://doi.org/10.1520/JTE20160072>
15. Zhang Z.X., Chi L. Y., Qiao Y. Fracture initiation, gas ejection, and strain waves measured on specimen surfaces in model rock blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021;54:647–663. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02300-2>
16. Borowski G., Smirnov Yu., Ivanov A., Danilov A. Effectiveness of carboxymethyl cellulose solutions for dust suppression in the mining industry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2020;42(8):2345–2356. <https://doi.org/10.1080/19392699.2020.1841177>
17. Cardu M., Saltarin S., Todaro C., Deangeli C. Precision rock excavation: beyond controlled blasting and line drilling. *Mining*. 2021;1(2):192–210. <https://doi.org/10.3390/mining1020013>
18. Лещинский А.В., Шевкун Е.Б., Лысак Ю.А. Управление дроблением железных руд взрывом – путь повышения эффективности обогащительного передела. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(4):41–52. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-41-52>  
Leschinsky A.V., Shevkun E.B., Lysak Yu.A. Control of iron ore fragmentation by blasting-way of improvement of processing efficiency. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(4):41–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-41-52>
19. Дарбинян Т.П., Цымбалов А.А., Зубов В.П., Колганов А.В. Влияние трещиноватости горного массива на разубоживание медно-никелевых вкрапленных руд при добыче их на руднике «Октябрьский». *Горный журнал*. 2023;(6):19–26. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.06.03>  
Darbinyan T.P., Tsymbalov A.A., Zubov V.P., Kolganov A.V. Impact of rock mass jointing on dilution of disseminated copper–nickel ore in Oktyabrsky Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(6):19–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.06.03>
20. Молдован Д.В., Чернобай В.И., Ястребова К.Н. Влияние композитного материала в конструкции забойки на ее работоспособность. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9–1):110–121. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_110](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_110)  
Moldovan D.V., Chernobay V.I., Yastrebova K.N. The influence of composite material in the stemming design on its operability. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9–1):110–121. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_110](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_110)
21. Протосеня А.Г., Беляков Н.А., Буслова М.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением. *Записки Горного института*. 2023;262:619–627. URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15942>  
Protosenya A.G., Belyakov N.A., Bouslova M. A. Modelling of the stress-strain state of block rock mass of ore deposits during development by caving mining systems. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:619–627. URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15942>
22. Раджаоалисон Х., Злотковски А., Рамболаманана Г. Определение механических свойств песчаника неразрушающим методом. *Записки Горного института*. 2020;241:113–117. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.113>  
Rajaoalison H., Zlotkowski A., Rambolamanana G. Mechanical properties of sandstone using non-destructive method. *Journal of Mining Institute*. 2020;241:113–117. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.113>
23. Панасюк В.В. *Предельное равновесие хрупких тел с трещинами*. Киев: Наукова думка; 1991. 411 с.  
Panasyuk V.V. *Limit equilibrium of brittle bodies with fractures*. Kyiv: Naukova Dumka; 1991. 411 p. (In Russ.)
24. Бычков Г.В., Кокунина Л.В., Казаков С.В. Буровзрывной способ добычи монолитов и блоков природного камня. *Горный журнал*. 2008;(1):45–49.  
Bychkov G.V., Kokunina L.V., Kazakov S.V. Drilling and blasting method of mining of monoliths and natural stone blocks. *Gornyi Zhurnal*. 2008;(1):45–49. (In Russ.)
25. Blair D.P. Dynamic response of mine pit walls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;106:14–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2018.04.002>



26. Зубов В.П., Ли Юньпэн. Слойная система разработки мощных пологих угольных пластов на шахтах Китая: проблемные вопросы, направления совершенствования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(7):37–51. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_7\\_0\\_37](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_37)  
Zubov V.P., Li Yunpeng. Slicing mining of thick gently dipping coal in China: Problems and improvement. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(7):37–51. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_7\\_0\\_37](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_37)
27. Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряженно-деформированное состояние массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2023;13(4):177–187. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.34.99.014>  
Kongar-Syuryun Ch.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023;13(4):177–187. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.34.99.014>
28. Ефремов Э.И., Кравцов В.С., Мячина Н.Н. и др. *Основы теории и методы взрывного дробления горных пород*. Киев: Наукова думка; 1979. 224 с.  
Efremov E.I., Kravtsov V.S., Myachina N.N. et al. *Fundamentals of the theory and methods of explosive crushing of rocks*. Kyiv: Naukova Dumka; 1979. 224 p. (In Russ.)
29. Аленичев И.А., Рахманов Р.А. Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера. *Записки Горного института*. 2021;249:334–341. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.2>  
Alenichev I.A., Rakhmanov R.A. Empirical regularities investigation of rock mass discharge by explosion on the free surface of a pit bench. *Journal of Mining Institute*. 2021;249:334–341. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.2>
30. Elkarmoty M., Colla C., Gabrielli E. et al. A combination of GPR survey and laboratory rock tests for evaluating an ornamental stone deposit in a quarry bench. *Procedia Engineering*. 2017;191:999–1007. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.272>
31. Нефедов М.А. *Направленное разрушение горных пород взрывом*. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета; 1991. 188 с.  
Nefedov M.A. *Directed destruction of rocks by explosion*. St. Petersburg: St. Petersburg University Publ. House; 1991. 188 p.
32. Мешков А.А., Афанасьев П.И. *Физические основы взрывного разрушения горных пород*. Монография. М.: Горная книга; 2021. 124 с.  
Meshkov A.A., Afanasyev P.I. *Physical foundations of explosive destruction of rocks*. Monograph. Moscow: Gornaya Kniga; 2021. 124 p.
33. Чертков В.Я. Теоретическая оценка повышенной микротрещиноватости при взрывной отбойке блочного камня. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1983;(1):36–43.  
Chertkov V.Ya. Theoretical evaluation of increased microfracturing at block stone blasting. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Pererabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 1983;(1):36–43 (In Russ.)

### Информация об авторах

**Владимир Николаевич Ковалевский** – кандидат технических наук, доцент кафедры взрывного дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7155-2000](https://orcid.org/0000-0002-7155-2000), Scopus ID [57194598687](https://scopus.com/authorid/57194598687), ResearcherID [AAD-5379-2019](https://orcid.org/AAD-5379-2019); e-mail [Kovalevskiy\\_VN@pers.spmi.ru](mailto:Kovalevskiy_VN@pers.spmi.ru)

**Алексей Владимирович Мысин** – кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры геоэкологии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5968-8290](https://orcid.org/0000-0001-5968-8290), Scopus ID [57196262504](https://scopus.com/authorid/57196262504); e-mail [Mysin\\_AV@pers.spmi.ru](mailto:Mysin_AV@pers.spmi.ru)

**Вероника Ивановна Сушкова** – аспирант кафедры взрывного дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4247-6499](https://orcid.org/0000-0003-4247-6499), Scopus ID [58121433200](https://scopus.com/authorid/58121433200); e-mail [s235054@stud.spmi.ru](mailto:s235054@stud.spmi.ru)

### Information about the authors

**Vladimir N. Kovalevskiy** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Explosive Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7155-2000](https://orcid.org/0000-0002-7155-2000), Scopus ID [57194598687](https://scopus.com/authorid/57194598687), ResearcherID [AAD-5379-2019](https://orcid.org/AAD-5379-2019); e-mail [Kovalevskiy\\_VN@pers.spmi.ru](mailto:Kovalevskiy_VN@pers.spmi.ru)

**Alexey V. Mysyn** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer at the Department of Geoecology, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5968-8290](https://orcid.org/0000-0001-5968-8290), Scopus ID [57196262504](https://scopus.com/authorid/57196262504); e-mail [Mysin\\_AV@pers.spmi.ru](mailto:Mysin_AV@pers.spmi.ru)

**Veronica I. Sushkova** – PhD-Student at the Department of Explosive Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4247-6499](https://orcid.org/0000-0003-4247-6499), Scopus ID [58121433200](https://scopus.com/authorid/58121433200); e-mail [s235054@stud.spmi.ru](mailto:s235054@stud.spmi.ru)

Поступила в редакцию	06.12.2023	Received	06.12.2023
Поступила после рецензирования	28.01.2024	Revised	28.01.2024
Принята к публикации	01.02.2024	Accepted	01.02.2024