

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЭЛАСТИЧНЫХ ЗАРЯДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ДОБЫЧЕ БЛОЧНОГО КАМНЯ

В.Н. Ковалевский¹, А.В. Мысин¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: vladimir_kovalevskiy@mail.ru

Аннотация: В России, как и в любой другой части мира, блочный камень является важным строительным материалом, в частности, декоративный камень является основным материалом, из которого сделано наше богатое культурное наследие. Тем не менее индустрия добычи блочного камня сталкивается с новыми вызовами, обусловленными экономической целесообразностью и экологическими ограничениями. Дан обзор о существующем положении на мировом рынке стройматериалов и блочного камня. Отмечены существующие методы и способы повышения выхода кондиционной продукции. Выполнена количественная оценка образования отходов на всех этапах добычи и обработки блочного камня. Рассмотрены основные требования к взрывной технологии по добыче блочного камня из крепких скальных пород. Приведен тип зарядов взрывчатых веществ, обеспечивающий низкоскоростной режим взрывчатого превращения, позволяющий минимизировать зону наведенной трещиноватости вокруг шнура при отделении монолита от массива. Исследован механизм функционирования селективно-детонирующих зарядов с использованием скоростной фотосъемки. Определены оптимальные размеры эластичных трубчатых зарядов и их основные взрывчатые характеристики. Показано, что рассматриваемые конструкции зарядов позволяют в широких пределах регулировать динамические и временные параметры взрывного импульса при взрывании их в шнурах. Полученные результаты исследования позволят в дальнейшем осуществлять моделирование полей напряжений в горной породе при направленном расколе.

Ключевые слова: природный камень, добыча строительных материалов, взрывные работы, функционирование ЗЭТ «Гранилен», взрывчатые характеристики, ударные адиабаты смесового ВВ, скоростная фотосъемка процесса взрыва, численное моделирование.

Для цитирования: Ковалевский В. Н., Мысин А. В. Особенности функционирования трубчатых эластичных зарядов, применяемых при добыче блочного камня // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 20–34. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_20.

Performance of tubular elastic charges in natural stone production

V.N. Kovalevsky¹, A.V. Mysyn¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: vladimir_kovalevskiy@mail.ru

Abstract: In Russia like in any part of the world, dimension stone is a critical construction material, in particular, decorative stone is the main material which our rich cultural heritage is made of. Nonetheless, the dimension stone industry encounters new challenges governed by the economic expediency and environmental constraints. This article reviews the current world market of construction materials and dimension stone. The existing methods of high-quality production and its yield enhancement are discussed. The waste produced at each stage of dimension stone production is evaluated. The main requirements of blasting in hard dimension stone production are listed. The article describes the type of explosives to ensure low-velocity explosion transformation mode which minimizes the induced jointing zone around blastholes in stone separation from solid rock mass. The mechanism of selectively detonating charges is studied using the high-speed photography. The optimal sizes and main characteristics of tubular elastic charges are determined. It is shown that the described-design charges allow wide-range adjustment of the dynamics and time of explosive impulse in blastholes. The research findings can further enable modeling of stress fields in rocks during their directional splitting.

Key words: natural stone, production of construction materials, blasting, performance of tubular elastic charge Granilen, explosive characteristics, impact adiabates of mixed-type explosive, high-speed explosion photography, numerical modeling

For citation: Kovalevsky V. N., Mysin A. V. Performance of tubular elastic charges in natural stone production. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(1):20-34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_20.

Введение

Природный камень, который был добыт, отобран и обработан до определенных размеров или форм, с одной или несколькими механически обработанными поверхностями или без них, для использования в качестве облицовки зданий, бордюров, брусчатки, памятников и мемориалов, а также различных промышленных изделий, всемирно известен как «блочный камень» [38].

Индустрия блочного камня — это отрасль со значительным экономическим потенциалом, которая в последние годы переживает бурный рост. Несмотря на рост, эта отрасль сталкивается с рядом серьезных проблем, включая очень низкую эффективность, высокие производственные затраты, образование многих отходов и потери ресурсов на этапах добычи и переработки [1]. Рост доходов компаний, занимающихся добычей блоч-

ного камня, вызван продолжающейся урбанизацией. В результате этого годовой объем производства блочного и декоративного камня неуклонно растет [2]. Такое развитие характерно для стран, обладающих большим числом разрабатываемых месторождений блочного камня или потенциалом их освоения. На рис. 1 приведена статистика распределения объемов произведенной продукции из блочного камня за 2020 г. по странам.

Одним из важнейших факторов рентабельности в горнодобывающей промышленности является количество материалов, потерянных в производственных процессах. Согласно статистике, опубликованной в 2020 г. по странам с высококоразвитым минерально-сырьевым сектором, общее количество материала, ежегодно извлекаемого на карьерах по добыче блочного камня, составляет около 316 млн т. Около 161,5 млн т стали карьер-

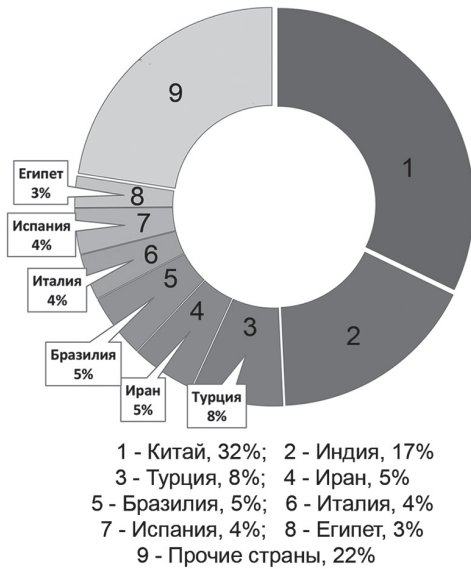


Рис. 1. Страны-лидеры по производству продукции из блочного камня

Fig. 1. The leading countries in the production of block stone products

ными отходами. Оставшиеся 154,5 млн т отправляются на камнеобработку на заводы, из них около 63,35 млн т превращается в отходы во время переработки, и в результате только 91,15 млн т приходится на конечный продукт [2].

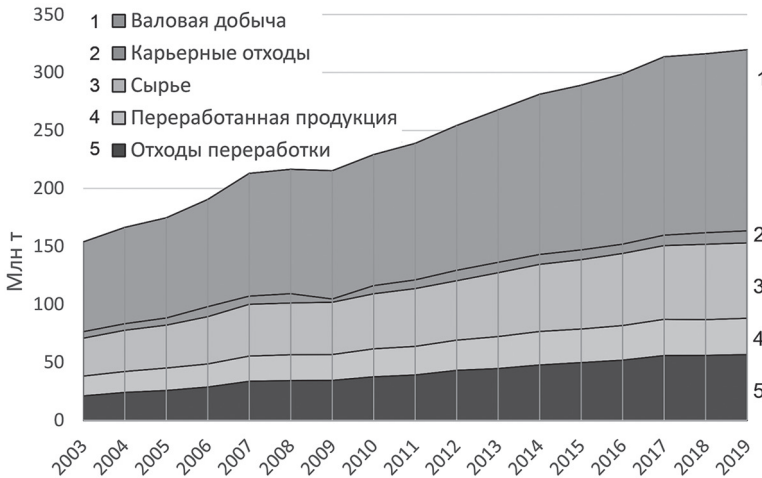


Рис. 2. Количество добытого сырья и отходов, образующихся на разных этапах разработки месторождений блочного камня

Fig. 2. The amount of extracted raw materials and waste generated at different stages of the development of block stone deposits

Динамику добычи камнеблоков и образующихся при этом отходов за последние 20 лет можно отследить на рис. 2.

Стоит отметить, что серьезная нагрузка на окружающую среду, сопутствующая любым объектам минерально-сырьевого комплекса [3, 4], имеет место и при эксплуатации блочных карьеров, в частности, сюда можно отнести загрязнение атмосферного воздуха [5], почвы [6]. Кроме того, карьеры, которые обычно расположены в небольших городах, оказывают большое влияние на социально-экономическое развитие региона [7, 8], поэтому большое значение имеют экономические факторы. Так, по данным за 2019 г. [9], доходы от сбыта блочного камня, в т.ч. декоративного, составили 45,5 млрд долларов во всем мире.

Что можно сделать, чтобы уменьшить количество всех материалов, которые часто считаются отходами, и тем самым повысить прибыль таких предприятий? Во-первых, есть возможность провести лучшие геолого-геотехнические исследования на участке, который предполагается разрабатывать. Во-вторых, можно использовать лучшие технологии разра-

ботки карьеров, которые целесообразно применять для достижения наилучшего баланса сырья с точки зрения маркетинга, а также безопасности труда и окружающей среды.

Разработка месторождений блочного камня предполагает применение как механических методов отделения монолита от массива [10], так и буровзрывного способа [11, 12]. Выбор метода отделения блоков камня от массива зависит от физико-механических свойств природного камня, его структурных особенностей, размеров и условий залегания толщи полезного ископаемого, экономических затрат.

Как правило, буровзрывной метод отделения монолита считается менее трудозатратным и экономически выгодным в сравнении с механическими методами [7]. Несмотря на то, что взрывное нагружение может привести к образованию дополнительных плоскостей в околешпуровой зоне, он пока остается востребованным при разработке прочных пород даже с высокой степенью трещиноватости [13].

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований [14–16] позволяют сформулировать основные требования к конструкциям зарядов буровзрывной технологии отделения камнеблоков от массива:

- взрыв зарядов взрывчатого вещества (ВВ) специальных конструкций должен обеспечивать отрыв монолита по контурной линии и перемещение его на расстояние 0,2 – 0,3 м;
- действие взрывных волн напряжений не должно приводить к развитию внутриблочных трещин и снижению прочности камня [17];
- конструкция заряда ВВ в шпуре должна обеспечивать равномерное приложение взрывной нагрузки по линии шпуров;
- амплитудное значение и длительность нагружения не должно превышать

величин, приводящих к образованию радиальных трещин в околешпуровой зоне;

- при взрыве заряда в шпуре максимальное (амплитудное) давление должно удовлетворять условию [18]:

$$\sigma_p^{дн} \leq P^* \leq P_{\max}(R_{тр}) \leq \sigma_i(r_0), \quad (1)$$

где $\sigma_p^{дн}$ – динамическая прочность породы на отрыв, МПа; P^* – максимальное давление продуктов взрыва на стенки шпура, МПа; $P_{\max}(R_{тр})$ – максимальное давление в шпуре, обеспечивающее допустимое трещинообразование радиусом $R_{тр}$, МПа; $\sigma_i(r_0)$ – предельно допустимая амплитуда импульса тангенциального напряжения на стенки шпура, МПа.

Динамическая прочность породы на отрыв определялась из выражения [18]:

$$\sigma_p^{дн} = k^{дн} [\sigma_p^{ст}], \quad (2)$$

где $k^{дн} = 4,8 - 0,97 \cdot 10^{-11} \rho_n c_n^2$, $k^{дн} = 3,44 - 0,2 \cdot 10^{-10} \rho_n c_n^2$ – коэффициент динамичности на отрыв в монолитных породах, в трещиноватых (затронутых выветриванием) породах соответственно; $\sigma_p^{ст}$ – статическая прочность породы на отрыв, МПа; ρ_n – плотность породы, кг/м³; c_n – скорость продольной волны, м/с.

Как показали результаты исследований [19] для крепких скальных пород типа гранитов, амплитудное значение давления на стенки шпуров в диапазоне временных интервалов нагружения $10^{-4} - 10^{-5}$ с не должно превышать 60–70 МПа. Среднее давление продуктов взрыва (20–25 МПа) позволяет создавать направленный рост трещин по линии шпуров при локализации остальных.

Длительность квазистатического давления продуктов взрыва должна быть больше или равной времени роста магистральной трещины [20, 21]:

$$t_{тр} \leq t_{заб} + 2h/c_0, \quad (3)$$

где $t_{тр}$ – время формирования магистральной трещины, с; $t_{заб}$ – время вылета

забойки, с; $2h/c_0$ — время многократного падения давления в шпуре, с; h — глубина шпура, м; $c_0 = \sqrt{\gamma \cdot P_0 / \rho_0}$ — скорость звука в продуктах взрыва при начальном давлении P_0 и плотности продуктов взрыва ρ_0 , м/с; γ — показатель политропы.

Из выражения (2) следует, что длительность действия квазистатического давления в шпуре можно регулировать применением различных видов забоек [22, 23] или глубиной шпура.

Достижение точности оконтуривания монолита, как правило, увязано с взаимодействием волн напряжений на стадии динамического волнового действия продуктов взрыва [24]. Для снижения негативного воздействия взрыва на отделяемый монолит необходимо достаточно аккуратно и точно подходить к выбору зарядов взрывчатых веществ, устанавливать их характеристики, определять эффективные параметры буровзрывных работ при их применении. Для решения этих вопросов необходимо предварительное изучение механизма функционирования зарядов специальных конструкций, установление их динамических и кинематических параметров.

Материалы и методы

Заряды из взрывчатого вещества «Гранилен» (рис. 3) представляют собой комбинированный патрон, состоящий из детонирующего шнура ДШЭ-12, выполняющего роль инициатора взрывного

импульса, и эластичного трубчатого заряда, выполняющего роль демпфера-газогенератора. Отрезок детонирующего шнура располагается аксиально в канале трубчатых зарядов, способных размещаться вдоль шнура и фиксироваться на нем на требуемой длине. Заряды из ВВ «Гранилен» имеют наружный диаметр 11, 15 и 17 мм, центральное отверстие для ДШЭ-12 — диаметром 6,1 мм, линейную массу 140–360 г/м. Основные характеристики зарядов ЗЭТ «Гранилен» приведены в табл. 1.

Для оценки динамического воздействия взрыва зарядов ЗЭТ «Гранилен» были выполнены расчеты для определения аналитических выражений ударных адиабат рассматриваемых смесевых ВВ «Гранилен». Ударная адиабата смесевых ВВ построена в предположении, что при распространении ударной волны по заряду ВВ давление во всех компонентах выравнивается, а теплообмена между ними не происходит.

Общий вид уравнения ударной адиабаты имеет вид

$$D = C_0 + aU + bU^2, \quad (4)$$

где D — скорость ударной волны, м/с; C_0 — скорость звука в веществе, м/с; U — скорость вещества за фронтом волны, м/с.

В результате решения были получены аналитические выражения обобщенной ударной адиабаты для составов «Гранилен-1, 2, 3» соответственно:



Рис. 3. Заряд эластичный трубчатый «Гранилен-1» (внешний вид)

Fig. 3. Elastic tubular charge «Granylène-1» (appearance)

Таблица 1

Свойства составов «Гранилен» и основные технические характеристики эластичных трубчатых зарядов

Properties of Granilene compositions and the main technical characteristics of elastic tubular charges

Показатели	ЗЭТ «Гранилен-1» (11×500мм)	ЗЭТ «Гранилен-2» (15×500мм)	ЗЭТ «Гранилен-3» (17×500мм)
Сенсибилизатор	кероген	гексоген	тротил
Кислородный баланс, %	±1,6	0	-0,65
Плотность, кг/м ³	1860	1870	1860
Теплота взрывчатого превращения, МДж/кг	1,55	2,67	2,0
Скорость взрывчатого превращения, м/с	1500	2600	2400
Линейная плотность энергии, кДж/кг	217	748	745
Объем газов, л/кг	416	490	440
Диаметр заряда, мм	11,0+0,5	15,0+0,5	17,0+0,5
Длина патрона, мм	500	500	500
Масса заряда, г	70	140	180
Линейная масса заряда, г/м	140	280	360
Диаметр шнура, мм	28 – 32	34 – 42	42 – 50

$$D = 2547 + 1,382 \cdot U + 5,056 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 ; (5)$$

$$D = 2542 + 1,448 \cdot U + 7,49 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 ; (6)$$

$$D = 2479 + 1,536 \cdot U + 1,536 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 . (7)$$

На рис. 4 графически отображены ударные адиабаты рассматриваемых составов.

Критический диаметр открытого заряда из ВВ «Гранилен-2» составляет

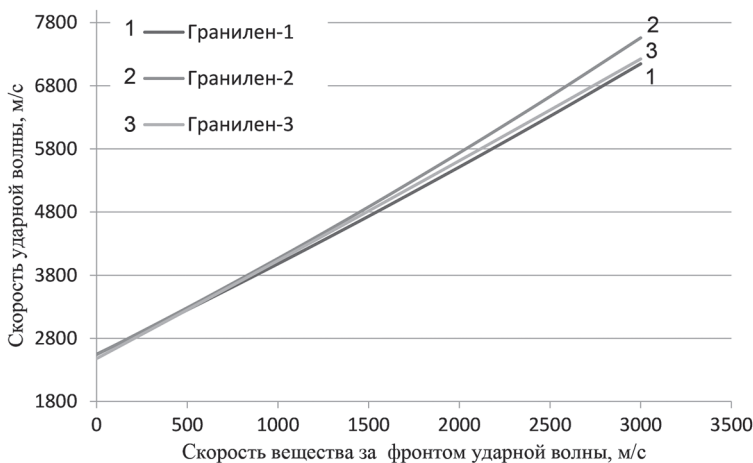


Рис. 4. Ударные адиабаты составов

Fig. 4. Shock adiabats of compositions

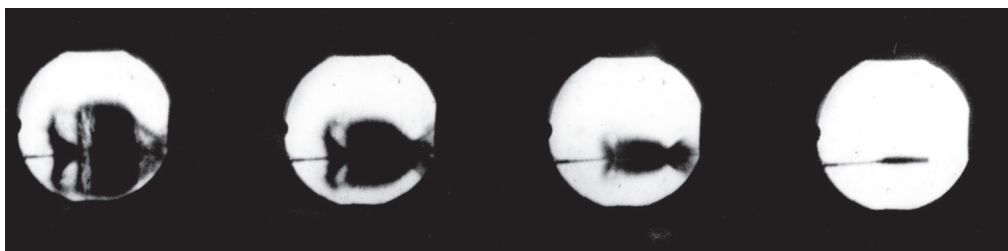


Рис. 5. Кинограмма процесса функционирования заряда «Гранилен-1»
 Fig. 5. Kinogram of the process of functioning of the charge «Granylene-1»

70 мм, поэтому режим устойчивой детонации со скоростью 3000–4000 м/с может иметь место при диаметрах зарядов, превышающих это значение.

Изучение процесса разлета продуктов взрыва в зарядах ЗЭТ «Гранилен» с центральным осевым инициатором в виде ДШЭ-12 проводился с использованием скоростного фоторегистратора СФР-2М совместно с теневой установкой ИАБ-452 [25, 26]. Съемка процесса функционирования зарядов осуществлялась в режиме «лупы времени» со скоростью 250 тыс. кадров в секунду. Исследовались заряды из ВВ «Гранилен-1» и «Гранилен-2», которые представляли собой полые трубки диаметром 11 и 15 мм, длиной 110 мм, нанизанные на отрезок детонирующего шнура ДШЭ-12. Кинограмма процесса функционирования заряда из ВВ «Гранилен-1» представлена на рис. 5.

Обоснованность предположения о наличии процесса низкоскоростного взрывчатого превращения при осевом иницировании зарядов ВВ «Гранилен» была подтверждена при проведении съемки в режиме фоторегистра. Фоторегистро-

грамма процесса взрывчатого превращения представлена на рис. 6.

Результаты

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в начальный момент времени под действием продуктов детонации от взрыва детонирующего шнура происходит сжатое деформирование и нарушение целостности высокоплотного заряда с последующим прорывом газов через образующиеся трещины. Основное влияние на этот процесс оказывают растягивающие радиальные напряжения, под действием которых образуются радиальные трещины, которые затем удлиняются за счет проникновения продуктов детонации. Как следствие, происходит разрушение трубчатого заряда в радиальном направлении, воспламенение и взрывчатое превращение его отдельных частей с образованием газообразных продуктов.

Увеличение глубины разложения ВВ «Гранилен», а также возникновение реакции в поверхностном слое взрывчатого вещества обусловлено распространением

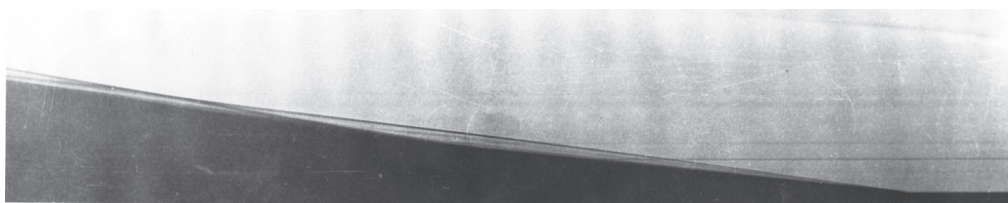


Рис. 6. Фоторегистрограмма процесса взрывчатого превращения
 Fig. 6. Photoregistrogram of the explosive transformation process

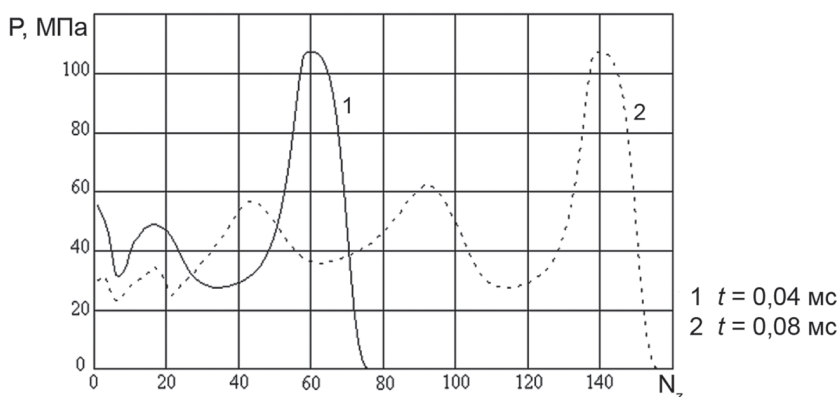


Рис. 7. Распределение давления на стенке шпура при взрыве заряда нитки ДШ и «Гранилен-2»
 Fig. 7. Pressure distribution on hole wall during the explosion of charge of detonating cord and «Granylène-2» thread

нием фронта разложения по нормали к трещинам в виде горения. Диссоциация и фазовые переходы продуктов реакции с низким тепловым эффектом определяют длительность протекания реакции.

Обработка скоростной фотосъемки процесса функционирования зарядов ВВ «Гранилен» в режимах фоторегистра и «лупы времени» показала, что заряды эластичные трубчатые благодаря монолитности и высокой плотности способны гасить ударную волну от детонирующего шнура и не создавать собственную в процессе взрывчатого превращения. Средняя скорость разлета продуктов взрыва составляет около 1420 м/с.

Известно [27 – 29], что процесс направленного разрушения горных пород обусловлен формированием и распространением по линии шпуров волн напряжений. Основным источником взрывного нагружения служат газодинамические процессы, происходящие в шпуре, создающие переменные нагрузки на стенки шпура. С целью изучения газодинамических процессов при взрывании зарядов ВВ «Гранилен» с кольцевым воздушным зазором было проведено математическое моделирование. Согласно работе [30], в основу численных расчетов положено следующее: энерговыделение при взрыве заряда рассматривает-

ся с учетом скорости распространения детонации по нитке ДШ и скорости взрывного превращения ВВ; стенки шпура полагаются абсолютно жесткими; детонационные и газодинамические процессы в шпуре описаны системой уравнений Эйлера, с добавлением в уравнение энергии члена, описывающего выделение энергии при детонации [31, 32].

Анализ результатов численного расчета приведем для случая взрыва в шпуре диаметром 42 мм заряда, состоящего из центрального инициатора — нитки ДШ и заряда ЗЭТ «Гранилен-2» диаметром 11,5 мм, расположенного соосно шпuru. Заряд сплошной без воздушных промежутков с кольцевым воздушным зазором. На рис. 7 представлено распределение давления на стенке шпура в различные моменты времени, по мере распространения детонации по нитке ДШ.

Следует отметить, что для каждого момента времени распределение давления имеет периодический характер с затуханием амплитуды максимумов давления. Эти максимумы вызваны косым падением головной воздушной волны на стенку шпура, ее отражением от стенки, последующим отражением от оси симметрии и распространением процесса по всей возмущенной области. Этот процесс развивается по мере распростране-

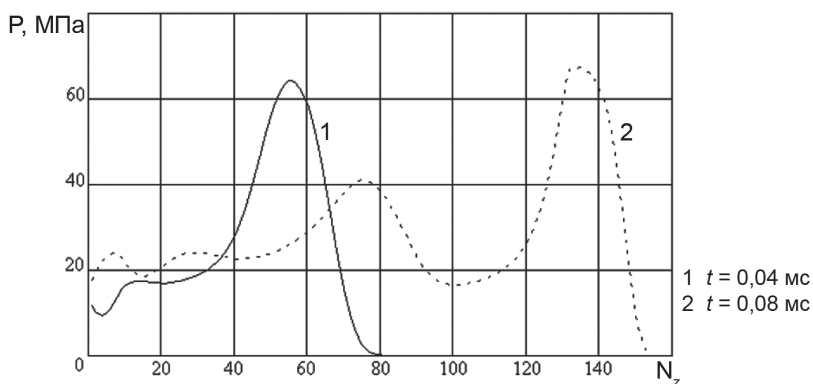


Рис. 8. Распределение давления на стенке шпура при взрыве заряда нитки ДШ и «Гранилен-1»
Fig. 8. Pressure distribution on hole wall during explosion of the charge of detonating cord and «Granylene-1» thread

ния детонации по длине шпура и носит стационарный характер, т.е. участки кривой распределения одинаковы для различных моментов времени с точностью до приустьевое участка шпура, где проявляются краевые эффекты. Важно, что скорость распространения первого максимума равна скорости детонации, а его амплитуда достигает величины, примерно в 7 раз превышающей величину среднего давления в шпуре, вычисленную по уравнению состояния для полной выделенной энергии в статическом случае. Но время действия максимальных нагрузок составляет всего $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ с, что на два порядка меньше характерного времени нарастания радиальных напря-

жений в горных породах типа гранита [33–35].

Аналогичным образом развиваются волновые процессы при взрыве заряда, состоящего из нитки ДШ и «Гранилен-1» (рис. 8). По мере распространения детонации по нитке ДШ по стенке шпура движется со скоростью детонации пик давления, достигающий в соответствии со свойствами ВВ меньшей, чем в случае «Гранилен-2», величины $P_{\max} = 68$ МПа, и имеющий несколько большую продолжительность.

Начиная с моментов времени $t \sim 0,3 \div 0,4$ с амплитуда изменения давления на стенке по длине шпура снижается, и можно рассматривать среднее давле-

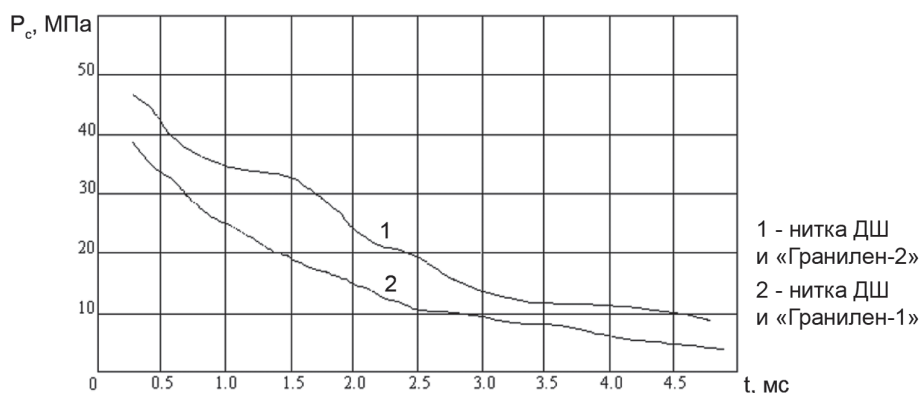


Рис. 9. Зависимость среднего давления на стенке шпура при взрыве заряда
Fig. 9. Dependence of the average pressure on the walls of the hole during the explosion of the charge

Таблица 2

Ожидаемые размеры зон трещинообразования
Expected sizes of crack formation zones

Показатели	Расстояние между шпурами, м			
	0,3	0,4	0,5	0,6
Давление в шпуре, МПа	31,0	42,5	55,5	67,0
Ожидаемый радиус трещинообразования, мм	26	30	35	38
Масса заряда в шпуре, мм	0,27	0,36	0,45	0,54

ние. На рис. 9 представлены зависимости величины среднего давления на стенке шпура от времени для обоих случаев. Несмотря на небольшие локальные особенности (определяющиеся компонентным составом зарядов), величина среднего давления уменьшается монотонно.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования на карьерах блочного камня [36] показали, что размеры зон нарушений породы зависят от физико-механических свойств породы, наличия в ней структурных дефектов, параметров взрывного импульса на стенки шпуров, который определяется типом взрывчатого вещества и конструкцией заряда. Ожидаемый радиус трещинообразования от взрыва зарядов ЗЭТ «Гранилен» можно оценить, используя формулу Пирса [37].

Выполненные в рамках данного исследования натурные опыты на изготовленных из добытых блоков гранитных образцах, с использованием краскового метода показали, что радиус зоны трещинообразования для зарядов ЗЭТ «Гранилен» лежит в пределах 30–42 мм. В табл. 2 приведены расчетные значения ожидаемого радиуса трещинообразования при отбойке гранитных блоков в шпурах (диаметр шпура 42 мм) при наличии подошвенной трещины зарядами ЗЭТ «Гранилен-2».

Заключение

На основе проведенных экспериментальных исследований с помощью скоро-

стной установки СФР-2М изучен механизм процесса взрывчатого превращения зарядов ЗЭТ «Гранилен» при осевом инициировании. Показано, что при принятой толщине слоя ВВ трубчатых зарядов и осевом инициаторе ДШЭ-12 возможен лишь низкоскоростной режим взрывчатого превращения. Таким образом, можно утверждать, что применение зарядов ЗЭТ «Гранилен» при добыче блочного камня не приведет к значительной нарушенности монолита в окошпуровой зоне.

Рассмотренные условия протекания газодинамических процессов в шпуре при функционировании зарядов ЗЭТ «Гранилен» подтверждают, что кратковременные нагрузки будут оказывать свое разрушающее воздействие лишь в непосредственной близости от стенки шпура.

Полученные результаты исследования позволят в дальнейшем осуществлять моделирование полей напряжений в горной породе при направленном расколе. Возможность рассредоточения патронов ЗЭТ «Гранилен» на детонирующем шнуре по длине шпура позволят изменять массу взрывчатого вещества в зарядной полости и, тем самым, регулировать параметры взрывчатого нагружения массива уже в процессе заряжания шпуров.

Высокий уровень безопасности применения трубчатых зарядов обеспечивается тем, что взорваны они могут быть только от детонационного шнура, расположенного в канале заряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jalalian M. H., Bagherpour R., Khoshouei M.* Wastes production in dimension stones industry: resources, factors, and solutions to reduce them // *Environmental Earth Sciences*. 2021, vol. 80, no. 560. DOI: 10.1007/s12665-021-09890-2.
2. *Yarahmadi R., Bagherpour R., Khademian A., Sousa L. M., Almasi S. N., Esfahani M. M.* Determining the optimum cutting direction in granite quarries through experimental studies: a case study of a granite quarry // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019, vol. 78, pp. 459–467. DOI: 10.1007/s10064-017-1158-5.
3. *Gendler S. G., Kovshov S. V.* Estimation and reduction of mining-induced damage of the environment and work area air in mining and processing of mineral stuff for the building industry // *Eurasian mining*. 2016, no. 1, pp. 45–49. DOI: 10.17580/em.2016.01.08.
4. *Курчин Г. С., Волков Е. П., Зайцева Е. В., Кирсанов А. К.* Проблемы экологии при добыче нерудных строительных материалов в России // *Современные проблемы науки и образования*. — 2013. — Т. 6. — С. 12–19.
5. *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, vol. 42, no. 8, pp. 2345–2356. DOI: 10.1080/19392699.2020.1841177.
6. *Пашкевич М. А., Быкова М. В.* Методология термодесорбционной очистки локальных загрязнений почв от нефтепродуктов на объектах минерально-сырьевого комплекса // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 253. — С. 49–60. DOI: 10.31897/PMI.2022.6.
7. *Careddu N.* Dimension stones in the circular economy world // *Resour Policy*. 2019, vol. 60, pp. 243–245. DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.01.012.
8. *Badeeb R. A., Lean H. H., Clark J.* The evolution of the natural resource curse thesis: a critical literature survey // *Resour Policy*. 2016, vol. 51, pp. 123–134. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.10.015.
9. *Gazi A., Skevis G., Founti M. A.* Energy efficiency and environmental assessment of a typical marble quarry and processing plant // *Journal of Cleaner Production*. 2012, vol. 32, pp. 10–21. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2012.03.007.
10. *Ashmole I., Motloung M.* Dimension stone: the latest trends in exploration and production technology Greenstone Marble and Granite. Ltd Finstone (SA). 2008, pp. 35–70.
11. *Mamasaidov M. T., Mendekeev R. A., Ismanov M. M.* Generalized model of technology for article production from stone massif // *Journal of Mining Science*. 2004, vol. 40, pp. 521–527. DOI: 10.1007/s10913-005-0038-8.
12. *Paramonov G. P., Kovalevskiy V. N., Mysin A. V.* Determination of the conditions of an effective functioning of elongated cumulative charges in processing the marble stone // *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 836, pp. 19–24. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.836.19.
13. *Ковалев А. В.* Направления совершенствования взрывной технологии добычи блочного камня в массиве с интенсивной трещиноватостью // *Горные науки и технологии*. — 2018. — № 1. — С. 23–34.
14. *Бычков В. Г., Кокунина Л. В., Казаков С. В.* Буровзрывной способ добычи монолитов и блоков природного камня // *Горный журнал*. — 2008. — № 1. — С. 45–49.
15. *Cardu M., Saltarin S., Todaro C., Deangeli C.* Precision rock excavation: Beyond controlled blasting and line drilling // *Mining*. 2021, vol. 1, pp. 192–210. DOI: 10.3390/mining1020013.
16. *Menzhulin M. G., Shishov A. N., Zditovetsky A. V.* Spare technology of hard stone blocks cut by using the low brisance explosives / *Proceedings of the Annual Symposium on Explosives and Blasting Research*. 1996, vol. 75000, pp. 196–202.
17. *Sanchidrian J. A., Garcia-Bermudez P., Jimeno C. L.* Optimization of granite splitting by blasting using notched holes // *Fragblast*. 2000, vol. 4, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1080/13855140009408059.
18. *Нефедов М. А.* Разработка технических решений и эффективных технологий направленного взрывного раскола и разрушения горных пород на карьерах стойматериалов: автореферат дис. ... доктора технических наук. — СПб.: СПбГГИ, 1993. — 38 с.

19. 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, vol. 54, pp. 647 – 663. DOI: 10.1007/s00603-020-02300-2.

20. Лещинский А. В., Шевкун Е. Б., Лысак Ю. А. Управление дроблением железных руд взрывом – путь повышения эффективности обогатительного передела // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 4. – С. 41 – 52. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-41-52.

21. Khomeriki S., Mataradze E., Chikhradze N., Losaberidze M., Khomeriki D., Shatberashvili G. Elaboration of the charge constructions of explosives for the structure of facing stone // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 95, no. 4, article 042032. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042032.

22. Saqib S., Tariq S. M., Ali Z. Improving rock fragmentation using airdeck blasting technique // *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015, vol. 17, no. 1, pp. 46 – 52.

23. Pal Roy P. Emerging trends in drilling and blasting technology: concerns and commitments // *Arabian Journal of Geosciences*. 2021, vol. 14, article 652. DOI: 10.1007/s12517-021-06949-z.

24. Румянцев А. Е., Парамонов Г. П., Ковалевский В. Н. К вопросу влияния параметров заряда и свойств ВВ на формирование контурной щели // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – № 5. – С. 309 – 313.

25. Гарнов В. В., Горюнов Б. Г., Сицинская Н. М. Высокоскоростная фоторегистрирующая аппаратура для регистрации ядерных взрывов и других быстротекущих процессов // *Физика горения и взрыва*. – 2004. – Т. 40. – № 6. – С. 132 – 137.

26. Гарнов В. В. Оптические приборы для регистрации ядерных взрывов // *История атомного проекта*. Вып. 11. – М.: РНЦ «Курчатовский институт», 1997. – С. 75 – 81.

27. Ефремовцев Н. Н., Трофимов В. А., Шиповский И. Е. Локализация деформаций в волновом поле, наведенном взрывом удлиненного заряда // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 8. – С. 73 – 85. DOI: 10.25018/0236-14932020-8-0-73-85.

28. Андреев Р. Е., Гридина Е. Б., Жихарев С. Я. Исследование формирования направленного раскола при взрыве удлиненных зарядов взрывчатого вещества // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2018. – № 2. – С. 203 – 214.

29. Kudryavtsev A. N., Epstein D. B. Hysteresis phenomenon at interaction of shock waves generated by a cylinder array // *Shock Waves*. 2012, vol. 22, no. 4, pp. 341 – 349.

30. Гоголев В. М., Менжулин М. Г., Шишов А. Н., Шилова Р. В. Одношаговый метод «крупных частиц» решения двумерных нестационарных задач газовой динамики с выделением разрывов // *Фундаментальные проблемы физики ударных волн*. – 1987. – Т. 2. – С. 145 – 147.

31. Крюков Г. М., Смагер И. В., Дрозд И. И. Закономерности формирования зон мелкодисперсного и радиального трещинообразования при разрушении пород взрывом удлиненных зарядов // *Записки Горного института*. – 2001. – Т. 148. – № 1. – С. 131.

32. Аленичев И. А., Рахманов Р. А., Шубин И. Л. Оценка действия взрыва скважинного заряда в ближнем поле с целью оптимизации параметров буровзрывных работ в приконтурной зоне карьера // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 4. – С. 85 – 95. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-85-95.

33. Cai M. Practical estimates of tensile strength and hoek – brown strength parameter mi of brittle rocks // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2010, vol. 43, pp. 167 – 184. DOI: 10.1007/s00603-009-0053-1.

34. Saadati M., Forquin P., Kenneth Weddfelt, Larsson P. L., François Hild On the mechanical behavior of granite material with particular emphasis on the influence from pre-existing cracks and defects // *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM International. 2018, vol. 46, pp. 33 – 45. DOI: 10.1520/JTE20160072.

35. Оника С. Г., Орловский В. Ч., Халявкин Ф. Г., Гец А. К. Сейсмотехнология крупномасштабных взрывных работ в карьерах природного камня // Горный журнал. — 2020. — № 11. — С. 26—30. DOI: 10.17580/gzh.2020.11.03.

36. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка влияния температурных условий на естественную вентиляцию глубоких карьеров Арктической зоны // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 218—228. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75.

37. Должиков В. В., Рядинский Д. Э., Яковлев А. А. Влияние интервалов замедления на амплитуды волн напряжений при изучении модели взрыва системы скважинных зарядов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 18—32. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_18.

38. ASTM C118-16: Standard Terminology Relating to Dimension Stone ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016, DOI: 10.1520/C0119-20. **ПЛАТ**

REFERENCES

1. Jalalian M. H., Bagherpour R., Khoshouei M. Wastes production in dimension stones industry: resources, factors, and solutions to reduce them. *Environmental Earth Sciences*. 2021, vol. 80, no. 560. DOI: 10.1007/s12665-021-09890-2.

2. Yarahmadi R., Bagherpour R., Khademian A., Sousa L. M., Almasi S. N., Esfahani M. M. Determining the optimum cutting direction in granite quarries through experimental studies: a case study of a granite quarry. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019, vol. 78, pp. 459—467. DOI: 10.1007/s10064-017-1158-5.

3. Gendler S. G., Kovshov S. V. Estimation and reduction of mining-induced damage of the environment and work area air in mining and processing of mineral stuff for the building industry. *Eurasian mining*. 2016, no. 1, pp. 45—49. DOI: 10.17580/em.2016.01.08.

4. Kurchin G. S., Volkov E. P., Zaytseva E. V., Kirsanov A. K. Environmental problems in the extraction of non-metallic building materials in Russia. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013, vol. 6, pp. 12—19. [In Russ].

5. 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, vol. 42, no. 8, pp. 2345—2356. DOI: 10.1080/19392699.2020.1841177.

6. Pashkevich M. A., Bykova M. V. Methodology for thermal desorption treatment of local soil pollution by oil products at the facilities of the mineral resource industry. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 49—60. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.6.

7. Careddu N. Dimension stones in the circular economy world. *Resour Policy*. 2019, vol. 60, pp. 243—245. DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.01.012.

8. Badeeb R. A., Lean H. H., Clark J. The evolution of the natural resource curse thesis: a critical literature survey. *Resour Policy*. 2016, vol. 51, pp. 123—134. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.10.015.

9. Gazi A., Skevis G., Founti M. A. Energy efficiency and environmental assessment of a typical marble quarry and processing plant. *Journal of Cleaner Production*. 2012, vol. 32, pp. 10—21. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2012.03.007.

10. Ashmole I., Motloung M. *Dimension stone: the latest trends in exploration and production technology Greenstone Marble and Granite*. Ltd Finstone (SA). 2008, pp. 35—70.

11. Mamasaidov M. T., Mendekeev R. A., Ismanov M. M. Generalized model of technology for article production from stone massif. *Journal of Mining Science*. 2004, vol. 40, pp. 521—527. DOI: 10.1007/s10913-005-0038-8.

12. Paramonov G. P., Kovalevskiy V. N., Mysin A. V. Determination of the conditions of an effective functioning of elongated cumulative charges in processing the marble stone. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 836, pp. 19—24. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.836.19.

13. Kovalev A. V. Directions for improving the explosive technology of block stone mining in an array with intense fracturing. *Gornye nauki i tekhnologii*. 2018, no. 1, pp. 23—34. [In Russ].

14. Bychkov V. G., Kokunina L. V., Kazakov S. V. Drilling and blasting method for the extraction of monoliths and blocks of natural stone. *Gornyi Zhurnal*. 2008, no. 1, pp. 45 – 49. [In Russ].
15. Cardu M., Saltarin S., Todaro C., Deangeli C. Precision rock excavation: Beyond controlled blasting and line drilling. *Mining*. 2021, vol. 1, pp. 192 – 210. DOI: 10.3390/mining1020013.
16. Menzhulin M. G., Shishov A. N., Zditovetsky A. V. Spare technology of hard stone blocks cut by using the low brisance explosives. *Proceedings of the Annual Symposium on Explosives and Blasting Research*. 1996, vol. 75000, pp. 196 – 202.
17. Sanchidrian J. A., Garcia-Bermudez P., Jimeno C. L. Optimization of granite splitting by blasting using notched holes. *Fragblast*. 2000, vol. 4, no. 1, pp. 1 – 11. DOI: 10.1080/13855140009408059.
18. Nefedov M. A. *Razrabotka tekhnicheskikh resheniy i effektivnykh tekhnologiy napravlenogo vzryvnogo raskola i razrusheniya gornykh porod na kar'erakh stoymaterialov* [Development of technical solutions and effective technologies for directed explosive splitting and destruction of rocks in the quarries of building materials], Doctor's thesis, Saint-Petersburg, SPbGGI, 1993, 38 p.
19. 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, vol. 54, pp. 647 – 663. DOI: 10.1007/s00603-020-02300-2.
20. Leschinsky A. V., Shevkun E. B., Lysak Yu. A. Control of iron ore fragmentation by blasting – way of improvement of processing efficiency. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 4, pp. 41 – 52. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-41-52.
21. Khomeriki S., Mataradze E., Chikhradze N., Losaberidze M., Khomeriki D., Shatberashvili G. Elaboration of the charge constructions of explosives for the structure of facing stone. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 95, no. 4, article 042032. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042032.
22. Saqib S., Tariq S. M., Ali Z. Improving rock fragmentation using airdeck blasting technique. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015, vol. 17, no. 1, pp. 46 – 52.
23. Pal Roy P. Emerging trends in drilling and blasting technology: concerns and commitments. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021, vol. 14, article 652. DOI: 10.1007/s12517-021-06949-z.
24. Rumyantsev A. E., Paramonov G. P., Kovalevskiy V. N. Effect of blasthole charge design and properties of an explosive on quality of a perimeter hole. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. 5, pp. 309 – 313. [In Russ].
25. Garnov V. V., Goryunov B. G., Sicinskaya N. M. High-speed photographic equipment for registration of nuclear explosions and other fast processes. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2004, vol. 40, no. 6, pp. 132 – 137. [In Russ].
26. Garnov V. V. *Opticheskie pribory dlya registratsii yadernykh vzryvov. Istoriya atomnogo proekta*. Vyp. 11 [Optical instruments for registration of nuclear explosions. Istoriya atomnogo proekta], Moscow, RNTS «Kurchatovskiy institut», 1997, pp. 75 – 81.
27. Efremovtsev N. N., Trofimov V. A., Shipovskii I. E. Strain concentration in wave field generated by blasting in elongated boreholes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 8, pp. 73 – 85. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-14932020-8-0-73-85.
28. Andreev R. E., Gridina E. B., Zhiharev S. Ya. Investigation of the formation of a directional split during the explosion of elongated explosive charges. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2018, no. 2, pp. 203 – 214. [In Russ].
29. Kudryavtsev A. N., Epstein D. B. Hysteresis phenomenon at interaction of shock waves generated by a cylinder array. *Shock Waves*. 2012, vol. 22, no. 4, pp. 341 – 349.
30. Gogolev V. M., Menzhulin M. G., Shishov A. N., Shilova R. V. One-step method of «large particles» for solving two-dimensional non-stationary problems of gas dynamics with discontinuity detection. *Fundamental'nye problemy fiziki udarnykh voln*. 1987, vol. 2, pp. 145 – 147. [In Russ].

31. Kryukov G. M., Smager I. V., Drozd I. I. Patterns of the formation of zones of fine and radial cracking during the destruction of rocks by an explosion of elongated charges. *Journal of Mining Institute*. 2001, vol. 148, no. 1, pp. 131. [In Russ].

32. Alenichev I. A., Rakhmanov R. A., Shubin I. L. Assessment of near-field blast effect toward optimized drilling-and-blasting in pit wall rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 4, pp. 85–95. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-85-95.

33. Cai M. Practical estimates of tensile strength and hoek – brown strength parameter mi of brittle rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2010, vol. 43, pp. 167–184. DOI: 10.1007/s00603-009-0053-1.

34. Saadati M., Forquin P., Kenneth Weddfelt, Larsson P. L., François Hild On the mechanical behavior of granite material with particular emphasis on the influence from pre-existing cracks and defects. *Journal of Testing and Evaluation, ASTM International*. 2018, vol. 46, pp. 33–45. DOI: 10.1520/JTE20160072.

35. Onika S. G., Orlovsky V. Ch., Khalyavkin F. G., Gets A. K. Seismic safety of large-scale blasting in natural stone quarries. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 11, pp. 26–30. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.11.03.

36. Gendler S. G., Borisovsky I. A. Estimated impact of temperature conditions on deep pits natural ventilation in the Arctic. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 218–228. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75.

37. Dolzhikov V. V., Ryadinsky D. E., Yakovlev A. A. Influence of deceleration intervals on the amplitudes of stress waves during the explosion of a system of borehole charges. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 18–32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_18.

38. *ASTM C118-16: Standard Terminology Relating to Dimension Stone ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA, 2016, DOI: 10.1520/C0119-20.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ковалевский Владимир Николаевич¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: vladimir_kovalevskiy@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7155-2000,

Мысин Алексей Владимирович¹ — канд. техн. наук,
старший преподаватель,
e-mail: Mysin_AV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5968-8290,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Ковалевский В.Н., e-mail: vladimir_kovalevskiy@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Kovalevsky¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: vladimir_kovalevskiy@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7155-2000,

A.V. Mysin¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer,
e-mail: Mysin_AV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5968-8290,

¹ Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: V.N. Kovalevsky, e-mail: vladimir_kovalevskiy@mail.ru.

Получена редакцией 15.06.2022; получена после рецензии 08.08.2022; принята к печати 10.12.2022.

Received by the editors 15.06.2022; received after the review 08.08.2022; accepted for printing 10.12.2022.