

# КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАПИРАНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ВО ВЗРЫВНОЙ ПОЛОСТИ

Д. В. Молдован<sup>1</sup>, В. И. Чернобай<sup>1</sup>, С. Т. Соколов<sup>1</sup>, А. В. Баженова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

**Аннотация:** в связи с увеличением объёма горных выработок появляется необходимость решать острые вопросы добычи. Несмотря на давно разработанные требования по применению забоечного материала при производстве взрывных работ, возникают разногласия из-за технических и технологических сложностей. Рассмотрена проблема качества взрывоподготовки горной массы для дальнейшей переработки. Приведены данные, которые могут решить проблему удержания продуктов взрыва в зарядной камере. Описано влияние применения комбинированной забойки на изменение параметров сейсмозврывной волны. На основе промышленных испытаний и дальнейшей обработки полученных данных сделаны выводы по решению актуальной проблемы. Лучший выход, по мнению авторов, – применение комбинированных забоек, таких как запирающая забойка в сочетании с сыпучей. Данная конструкция позволит за счёт расклина забойки удерживать продукты взрыва во взрываемой полости, сыпучая забойка (отсев, песок) позволит удерживать ее за счет своего веса. Ударная волна, проходя через распор воронки, многократно отражается от стенок внутренней поверхности, дольше взаимодействуя со стенками скважины. Продукты детонации плавно истекают через выходное отверстие забойки, не создавая ударного воздействия.

**Ключевые слова:** взрыв, продукты детонации, гранулометрический состав, забойка, сейсмозврывная волна, запирающее устройство, развал горной массы, запирающее устройство.

**Для цитирования:** Молдован Д. В., Чернобай В. И., Соколов С. Т., Баженова А. В. Конструктивные решения запираения продуктов взрыва во взрывной полости // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 5–17. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_5.

## Design concepts for explosion products locking in chamber

D. V. Moldovan<sup>1</sup>, V. I. Chernobay<sup>1</sup>, S. T. Sokolov<sup>1</sup>, A. V. Bazhenova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, 2, 21 Line of Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia

**Abstract:** Due to the increase in the volume of mine workings, there is a need to solve acute mining issues. Despite the long-established standard procedure of blasting with stemming, there are conflicting approaches in use of stemming due to technical and technological difficulties. The authors investigate the quality of rock mass explosive preparation for further processing. Provide data helpful to find an effective way of keeping explosion products in the explosion chamber. Study combined stemming impact on seismic explosion wave parameters. The conclusions and relevant decisions are provided based on industrial trials results and further data processing. All things considered, the most effective is the combined stemming type, such as locking and bulk one. This kind of stemming enables to keep the explosion

products in chamber due to the stemming wedge and bulk stemming (fines, sand) keeps things by its weight. The shock wave passing through the funnel spacer repeatedly reflects from the inner walls, interacting with the borehole walls for a longer time. The detonation products flow slowly through the stemming outlet without any shock impact.

**Key words:** explosion, detonation product, granulometric composition, stemming, seismic wave, locking device, collapse of the mountain mass, locking device.

**For citation:** Moldovan D. V., Chernobay V. I., Sokolov S. T., Bazhenova A. V. Design concepts for explosion products locking in chamber. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6-2):5-17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_5.

## Введение

В современном мире возрастают тенденции, влияющие на различные отрасли экономики страны, в том числе и на ситуацию в горнодобывающей промышленности; объем горных выработок значительно возрастает. Жесткая экономическая конкуренция диктует требования эффективности горных работ.

Несмотря на устоявшиеся правила ведения взрывных работ, появляются сомнения в необходимости применения забойки как одного из основных факторов повышения коэффициента полезного действия и увеличения коэффициента использования шпура (КИШ) [1 — 4]. Однако данные разногласия возникают из-за технических и технологических причин.

Отмену забойки зачастую обуславливают экономической причиной, а именно специфическими условиями той или иной местности, где находится горное предприятие [5, 6].

## Обзор литературы

Для максимума передаваемой энергии на горный массив продуктами детонации необходимо как можно дольше удерживать их в зарядной полости. С данной задачей должны справляться забойки различных конструкций и материалов [7, 8, 9, 10]. На карьерах строительных материалов зачастую используют песчано-гравий-

ную смесь либо буровой шлам. Данная забойка сможет обеспечить надежное запираение продуктов взрыва на период не более 7–8 мс, однако этого времени недостаточно для полной передачи продуктами детонации энергии на стенки взрывной скважины [11, 12].

Из вышесказанного можно сделать вывод, что от материала, используемого для забойки, зависит ее качество, а именно время удержания газообразных продуктов взрыва и удобство в обращении и применении, а также цена изделия.

С учетом физико-механических свойств, которыми должна обладать забойка, они бывают:

- из пластических материалов (глиняная, песчано-глинистая);
- мелкозернистая (песчаная, из буровой мелочи);
- крупнозернистая (щебень).

Вылет забойки из взрывной полости подчиняется движению зернистого забоечного материала, поэтому скорость ее движения определяется электромагнитным методом [13].

На торец скважины при взрыве начинают действовать газообразные продукты взрыва, происходит ее уплотнение. При превышении давлением сил внутреннего сцепления происходит срез вдоль стенок взрывной камеры, где находится забойка, и ее вылет.

Проанализировав литературные источники, можно сделать вывод, что

с ростом длины заряда увеличивается и длина забойки [14]. С ростом заряда возрастает среднее давление в скважине, что негативно сказывается на качестве разрушенной горной массы.

Применение забойки также отражается и на сейсмическом эффекте от действия взрыва. Данные, приведенные в [15 – 19], показывают, что ведение взрывных работ без применения забоечного материала увеличивает скорости сейсмических колебаний, а самым эффективным способом снижения скорости смещения является забойка с воздушным промежутком.

### **Методы исследования**

На практике отказ от забойки приводит к увеличению расхода взрывчатого вещества (ВВ) (таблица), количества скважин (шпуров) и, как следствие, расхода на бурение, и также снижению КИШ [3].

При рассмотрении данных, приведенных в таблице, можно заметить, что при массе заряда от 50 до 80 кг ширина развала горной массы, а также проработка нижележащего уступа ощутимо не изменились как при использовании забойки, так и без нее.

Однако при уменьшении массы заряда до 40 кг отсутствие забойки отрицательно сказалось на качестве проработки подошвы уступа — появились «пороги». Результаты опытных взрывов, представленные в таблице, указывают на массу заряда, при которой возникает влияние забойки на качество взрывоподготовки горной массы. Таким образом, применение забойки имеет экономический эффект, так как при ее использовании можно снизить массу заряда взрывчатого вещества почти вдвое, при этом не снижая качество взрыва, а именно проработку подошвы уступа. Кроме того, снижение заряда, а следовательно и диаметра взрывной

полости, приводит к лучшему рассредоточению взрывчатого вещества по массиву, что в свою очередь оптимизирует гранулометрический состав разрушенной горной массы. Анализируя результаты замеров скорости смещения грунта (см/с), можно сделать выводы, что применение зарядов с забойкой изменяет характер передачи энергии взрыва массиву и влияет на затухание волн напряжений в массиве. Комбинированная конструкция забойки позволяет снижать сейсмоэффект в 1,4 – 2 раза; данные, полученные в ходе наших экспериментов, соответствуют результатам, полученным [20, 21].

Несмотря на все доводы, подавляющее количество взрывников, как теоретиков, так и практиков, придерживаются мнения, что применение забойки приводит к следующему:

- максимальному высвобождению потенциальной энергии [22], предотвращению потерь энергии при детонации, то есть к её полноте;

- увеличению начального давления газов, а также увеличению эффективной длины взрывной волны, которая определяет величину ЛНС согласно теории разрушения горных пород (ГП) отраженной волной [23];

- увеличению поршневого действия продуктов взрыва (ПВ) на стенки взрывной полости и длины радиальных трещин, образовавшихся при взрыве.

Существующие на сегодняшний день теоретические и эмпирические соотношения для определения наиболее оптимальных характеристик забойки не могут зачастую принимать во внимание следующие аспекты [24, 25, 26]:

- влияние свойств материалов забойки на её возможности по распырению в устье шпура (скважины), изменение плотности под действием давления, а также возможное движение под действием ПВ;

**Показатели опытных взрывов с использованием забойки и без**  
**Indicators of experimental explosions with and without a hammer**

Показатель	Порядковый номер опытного взрыва									
	1		2		3		4		5	
	Без забойки	С забойкой	Без забойки	С забойкой	Без забойки	С забойкой	Без забойки	С забойкой	Без забойки	С забойкой
Заряд ВВ в скважине, кг	80	80	70	70	60	60	50	50	40	40
Длина забойки, м/d	0	4,4/29	0	5,1/34	0	5,8/39	0	6,5/43	0	7,2/48
Суммарная масса ВВ, кг	800	800	630	630	360	360	300	300	240	240
Объем взорванной горной массы, м <sup>3</sup>	2360	2360	2120	2120	1420	1650	1420	1530	1290	1420
Выход горной массы, м <sup>3</sup> /пог.м	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	21,5	23,6
Удельный расход ВВ, кг/м <sup>3</sup>	0,34	0,34	0,30	0,30	0,25	0,25	0,21	0,21	0,19	0,19
Максимальный разлет кусков горной массы, м	200	200	150	150	100	50	65	25	35	—
Ширина развала разрушенной горной массы, м	18	18	13	13	11	10	9	8	8	5
Скорость колебаний см/с	4,87	3,04	4,20	3	4,11	2,56	2,93	1,73	2,43	1,27

– время задержки ПВ при различных способах инициирования [27];

– изменения давления по мере истечения ПВ из взрывной полости при различных конструкциях забойки и т.д. [28].

Возникшая при детонации ВВ в зарядной полости (шпур, скважина и т.д.) взрывная волна всегда стремится к центру заряда, отражаясь от стенок, такой процесс повторяется. По мере повторении отражений амплитуда волны затухает, теряя энергию, также

снижается избыточное давление [29, 30]. Длительность процесса повторения отражения волн от стенок взрывной полости зависит от:

- объема взрывной полости;
- суммарного сечения всех отверстий, по которым могут истекать продукты детонации (трещиноватость массива, естественная и наведенная буровзрывными работами, отверстия в конструкции запирающего устройства или забойки)

– взрывчатого вещества и скорости выделения продуктов детонации.

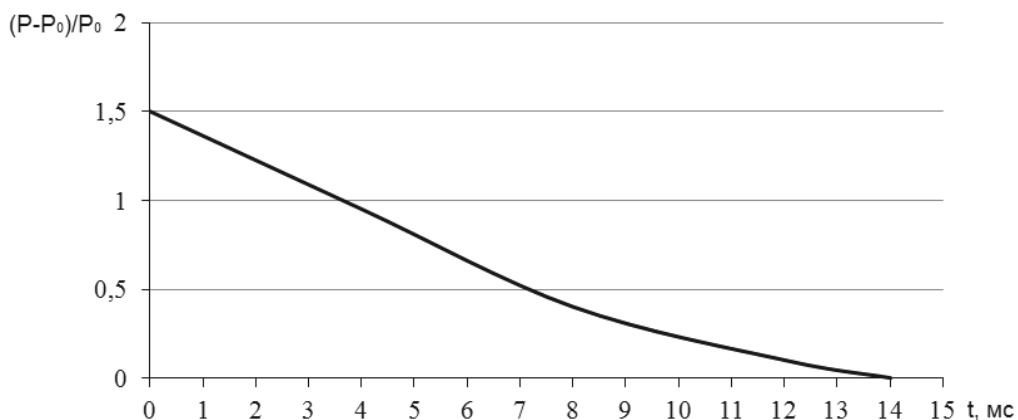


Рис. 1. Зависимость давления во взрывной полости от времени истечения продуктов детонации из взрывной полости:  $P_0$  — начальное давление во взрывной полости,  $P$  — давление в определённый момент времени

Fig. 1. Dependence of the pressure in the explosive cavity on the expiration time of detonation products from the explosive cavity:  $P_0$  is the initial pressure in the explosive cavity,  $P$  is the pressure at a certain point in time

### Результаты

На рис. 1 представлена зависимость давления, создаваемого продуктами взрыва, на стенки взрывной полости от времени их истечения.

В работе решалась аналогичная задача зависимости квазистатического давления от времени. В результате полученная формула в безразмерных величинах имеет вид:

$$\ln \bar{P} = \ln \bar{P}_1 - 2,13 \ln \bar{\tau}, \quad (1)$$

где  $\bar{P}$  и  $\bar{P}_1$  — нормализованные давления, Па;  $\bar{\tau}$  — безразмерное время истечения продуктов взрыва из взрывной полости;

$$\bar{P} = \frac{P(t)}{P_0}, \quad \bar{P}_1 = \frac{P_{кc} + P_0}{P_0}, \quad (2)$$

а  $P_{кc}$  — квазистатическое избыточное давление, Па. Безразмерное время истечения ПВ тогда определяется по формуле

$$\bar{\tau} = \bar{A}t = \left[ \alpha_1 A_n V^{-2} \right] \cdot \left[ t a_0 V^{-1} \right], \quad (3)$$

где  $\alpha_1$  — отношение эффективной площади поперечного сечения к внутренней площади поверхности взрывной полости шпура;  $A_n$  — площадь самой внутренней поверхности, м<sup>2</sup>;  $V$  — объём взрывной полости, м<sup>3</sup>,  $t$  — время, с;  $a_0$  — время звука в воздухе, м/с. В работе [31] высказывается целесообразность использования данных параметров, таким образом, уравнение (1) будет определять полное безразмерное время истечения ПВ  $\bar{\tau}_{max}$ :

$$\bar{\tau} = 0,4695 \ln \bar{P}_1. \quad (4)$$

Сопоставление результатов, представленных на рис. 1, а также расчетная формула (4) показывают невозможность определения максимального квазистатического давления из-за многократно повторяющихся волн, как распространяющихся, так и отражённых.

Полученные многократно экспериментальные данные показывают, что эффективность нагружения горной породы ПД во многом зависит от соотношения длины заряда ( $l_{зар}$ ) и длины забойки ( $l_{заб}$ ).

При исследовании разнообразных источников, описывающих конструктивные решения запора скважин [32 – 35], можно сделать следующие выводы:

- длина забойки должна быть невелика и надёжно запирает взрывную полость, следовательно, сыпучие забойки не отвечают таким требованиям, так как имеют большую длину;

- эффективность гидрозабоек такая, как и у предыдущих, однако их применение положительно с точки зрения пылеподавления;

- запирающие забойки также не отвечают всем предъявляемым требованиям, так как не соблюдается точка контакта лопастей со стенками взрывной полости при воздействии ПД;

- металлические конструкции хорошо запирают ПД на отрезок времени, требуемый для достаточного дробления горного массива, однако отрицательным недостатком их является высокая цена.

На основании материалов можно предположить, что наибольший эффект принесут комбинированные забойки [36, 37].

В этом случае запирающее устройство сверху удерживается сыпучей забойкой, как представлено на рис. 2.

### Анализ результатов

Преимущество данной конструкции состоит в том, что выделяющиеся ПВ не производят ударного действия на стенки взрывной полости, а плавно истекают через выходное отверстие. Скорость выхождения газов можно регулировать диаметром выходного отверстия устройства. Данная конструкция выполнена из полимерных материалов, пространство между профилем и стенками может заполняться химическими реагентами для снижения выброса ядовитых газов или пламегасителем.

При использовании такой конструкции достигается следующее:

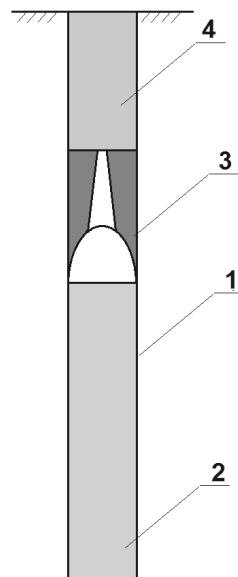


Рис. 2. Конструкция скважинного заряда с комбинированной забойкой: 1 – скважина, 2 – заряд взрывчатого вещества, 3 – запирающее устройство, 4 – сыпучая забойка  
**Fig. 2. The design of the borehole charge with a combined face:** 1 – well, 2 – explosive charge, 3 – locking device, 4 – loose face

- обеспечивается достаточное время удержания ПВ во взрывной полости, необходимое для максимального использования энергии взрыва;

- незначительная себестоимость при изготовлении;

- упрощенная технология установки устройства во взрывной полости.

Механизм качественного дробления массива достигается за счет запирания продуктов взрыва в скважине. Сравнительный анализ времени вылета забойки из скважины показывает, что новая конструкция удерживается в три раза дольше во взрывной полости. Ударная волна взаимодействует с распором внутренней стенки забойки, при этом внутренний материал выполняет роль амортизатора и впоследствии участвует в образовании пластического расплава (рис. 3).

Далее продукты детонации плавно исходят из взрывной полости, сокращая бризантное воздействие на скважины. Выход ПД можно регулировать диаметром выходного отверстия устройства. Измерения проводили на карьерах строительных материалов. Полученные данные были проанализированы и приведены на рис. 4.

Как видно из графика, при взрывании с обычной забойкой средний размер куска равняется 325 мм, а с использованием запирающей — 270 мм. Такой результат свидетельствует о лучшей проработке горного массива при более длительной задержке ПВ в зарядной полости на 15–20%.

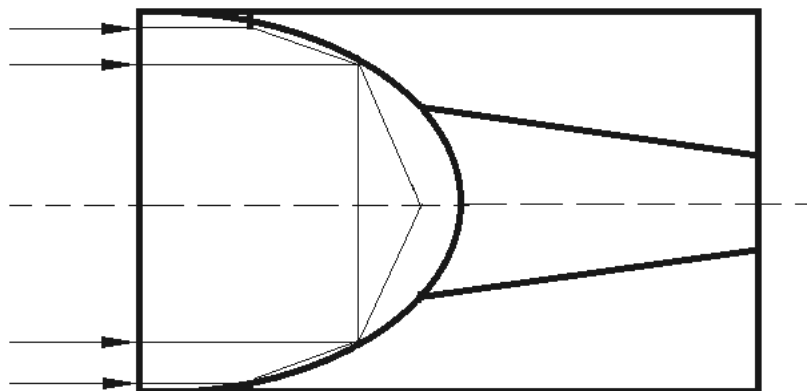


Рис. 3. Отражение ударных волн от стенки профиля забойки  
Fig. 3. Reflection of shock waves from the wall of the profile of the face

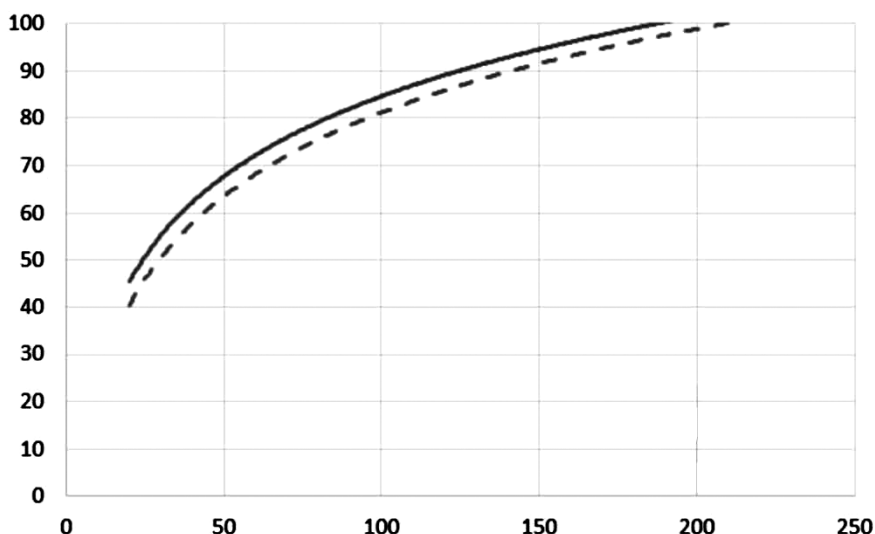


Рис. 4. Фракционный состав разрушенной горной массы: сплошная линия — используется стандартная песчано-гравийная забойка; пунктирная линия — используется профилированное запирающее устройство

Fig. 4. Fractional composition of the destroyed rock mass: solid line — a standard sand and gravel face is used, dotted line — a profiled locking device is used

## Заклучение

С точки зрения науки и практики, необходимо более точное изучение механизма передачи энергии взрыва в окружающую среду при использовании различных вариантов конструкций забочечных устройств.

На основе практических экспериментов и математического моделирования установлено, что ПД в зарядной полости при использовании запирающих забоек многократно воздействуют на стенки.

Выявлено, что скважинная запирающая забойка может удерживать ПД в зарядной полости 20 мс, при этом происходит плавное истечение их через осевой канал. Поэтому для снижения негативного ударного действия при изготовлении можно менять диаметр выходного отверстия. Таким образом возможно регулировать гранулометрический состав горной массы под заданные требования техники.

Данное устройство позволяет дробить массив горных пород без ссыльного воздействия на законтурную

область, тем самым при открытой разработке полезных ископаемых увеличить угол откоса, приближая его к прямому. Данный фактор может увеличить объемы добычи полезного ископаемого и положительно сказаться на производительности предприятия.

## Вклад авторов

*Молдован Дмитрий Владимирович* — идея, формулировка целей, разработка и написание методики проведения эксперимента, проведение экспериментов.

*Чернобай Владимир Иванович* — разработка методологии, разработка моделей расчета и обработки результатов.

*Соколов Семен Тарасович* — проведение экспериментов, обработка результатов, подготовка работы к опубликованию.

*Баженова Александра Владимировна* — проведение экспериментов, сбор и обработка результатов, подготовка работы к опубликованию.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubetskoy K. N., Galchenko Y. P.* Methodology for estimating promising development paradigm for mineral mining and processing industry // *Journal of Mining Science.* 2015, vol. 51, pp. 407–415. DOI: 10.1134/S1062739115020271.
2. *Викторов С. Д.* Взрывное разрушение породы — основа прогресса в горном деле // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2015. — №1. — С. 63–75.
3. *Zhang Z. X.* *Rock Fracture and Blasting.* Theory and Applications. Elsevier, Butterworth-Heinemann: Amsterdam, The Netherlands. 2016, 528 p.
4. *Silva J., Worsey T., Lusk B.* Practical assessment of rock damage due to blasting // *International Journal of Mining Science and Technology.* 2018, vol. 29, pp. 379–385.
5. *Monjezi M., Shahriar K., Dehghani H., Namin F. S.* Environmental impact assessment of open pit mining in Iran // *Environmental Earth Sciences.* 2008, vol. 58. pp. 205–216.
6. *Kim G., Jang J., Kim K. Y., Yun T. S.* Characterization of orthotropic nature of cleavage planes in granitic rock // *Engineering Geology.* 2020, vol. 265, 105432. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105432.
7. *Sasaoka T., Takahashi Y., Sugeng W., Hamanaka A.* Effects of rock mass conditions and blasting standard on fragmentation size at limestone quarries open journal of geology // *Open journal of geology.* 2015, vol. 5, pp. 331–339.
8. *Menjulin M. G., Kazmina A. J., Afanasew P. I.* Die Einwirkung der Sprengarbeiten auf den Erhaltungszustand des Massivs ausserhalb der Sprengzone mit und ohne



Vorspaltenbildung // Scientific reports on resource issues. Freiberg: International University of Resources. 2011, vol. 1, pp. 184–187.

9. *Sanchidrián J. A., Ouchterlony F., Segarra P., Moser P.* Size distribution functions for rock fragments // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014, vol. 71, pp. 81–94.

10. *Господариков А. П., Выходцев Я. Н., Зацепин М. А.* Математическое моделирование воздействия сейсмозрывных волн на горный массив, включающий выработку // Записки Горного института. — 2017. — Т. 226. — С. 405–411. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.405.

11. *Ефремов Е. И., Никифорова В. А.* Влияние диаметра скважины на площадь контакта взрывчатого вещества с разрушаемой породой и на выход мелких фракций // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. — 2012. — № 2 (10). — С. 9–15.

12. *Оверченко М. Н., Толстунов С. А., Мозер С. П.* Влияние горно-геологических условий и техногенных факторов на устойчивость взрывных скважин при открытой разработке апатит-нефелиновых руд // Записки Горного института. — 2018. — Т. 231. — С. 239–244. DOI:10.25515/PMI.2018.3.2399.

13. *Курчин Г. С., Лобацевич М. А., Петушкова Т. А., Ефремов П. Ю.* Эффективность применения забойки в скважинах // Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: Материалы IV Междунар. науч. конф. — Казань: 2018. — С. 17–19.

14. *Mihail M., Isheyskiy V., Vadim D.* Drilling and blasting influence on the process of dust particles formation // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018, vol. 9, pp. 97–103.

15. *Wang Y., Wang H., Cui C., Zhao B.* Investigating Different Grounds Effects on Shock Wave Propagation Resulting from Near-Ground Explosion // Applied Sciences, 2019. vol. 9, pp. 1–17. DOI: 10.3390/app9173639.

16. *Bukhartsev V. N., Pham N. T.* The effect of the structural model on estimating the bearing capacity of the ground base // Power Technology and Engineering. 2018, vol. 52 (4), pp. 389–394. DOI: 10.1007/s10749-018-0963-8.

17. *Dipaloke M., Viladkar M. N., Mahendra S.* Corrigendum to a multiple-graph technique for preliminary assessment of ground conditions for tunneling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018, vol. 9(17), pp. 278–286. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.10.010.

18. *Khandelwal M., Singh T. H.* Evaluation of Blast-Induces Vibration Predictors. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2007, vol. 27(2). pp. 116–125. DOI: 10.1016/j.soildyn.2006.06.004.

19. *Öncü M. E., Yön B., Akkoyun Ö., Taşkıran T.* Investigation of blast-induced ground vibration effects on rural buildings // Structural Engineering and Mechanics. 2015, vol. 54 (3), pp. 545–560. DOI: 10.12989/sem.2015.54.3.545.

20. *Koteleva N., Frenkel I.* Digital Processing of Seismic Data from Open-Pit Mining Blasts // Applied Sciences. 2021, vol. 11, pp. 380–383. DOI:10.3390/app11010383.

21. *Котиков Д. А., Шабаров А. Н., Цирель С. В.* Связь распространения сейсмических событий с тектоническим строением горного массива // Горный журнал. — 2020. — Т. 1. — С. 28–32. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05.

22. *Roy M. P., Singh P. K., Singh G., Monjezi M.* Influence of initiation mode of explosives in opencast blasting on ground vibration // Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology. 2007, vol. 116 (1), pp. 1–6. DOI: 10.1179/174328607X161888.

23. *Kotikov D. A., Tsirel S. V.* Dependence of the distribution of seismic events on the location of geological faults // Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development. Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, pp. 1448–1455.

24. Bormann P., Engdahl E. R., Kind R. Seismic wave propagation and Earth models. *New Manual of Seismological Observatory Practice*. Potsdam: German Research Center for Geosciences. 2012, pp. 1–105. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2\_ch2.

25. Koteleva N., Khokhlov S., Frenkel I. Digitalization in Open-Pit Mining: A New Approach in Monitoring and Control of Rock Fragmentation // *Applied Sciences*. 2021, vol. 11 (22), pp.1–16. DOI: 10.3390/app112210848.

26. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Управление аэродинамическими процессами при разработке золоторудных месторождений открытым способом // *Горный информационно-аналитический бюллетень* – 2021. – № 2 – С. 63–107. DOI:10.25018/0236-1493-2021-2-0–99–107.

27. Shevkun E., Leshchinsky A., Plotnikov A. Special aspects of explosive loosening with minimal rock displacement // *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 192, pp.1–7. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201003.

28. Heath D. J., Gad E. F., Wilson J. L. Blast Vibration and Environmental Loads Acting on Residential Structures: State-of-The-Art Review // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016, vol. 30 (2), pp. 1–6. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000750.

29. Василец В. Н., Афанасьев П. И., Павлович А. А. Обеспечение условий безопасной эксплуатации горнотранспортного комплекса при воздействии сейсмозрывных волн // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 1. – С. 26–35. DOI:10.25018/0236-1493-2020-1-0–26–35.

30. 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. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02–0-50–57.

31. Белин В. А., Горбонос М. Г., Астахов Е. О. Влияние средств инициирования на эффективность и безопасность взрывных работ // *Горный журнал*. – 2017. – № 7. – С. 63–67. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.12.


32. Fu X., Sheng Q., Zhang Y., Chen J. Application of the discontinuous deformation analysis method to stress wave propagation through a one-dimensional rock mass // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015, vol. 80, pp. 155–170. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.09.017.

33. Momeni A., Karakus M., Khanlari G. R., Heidari M. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite // *International Journal of Rock Mechanics and Mining*. 2015, vol. 77, pp. 89–96. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.029.

34. Leshchinskiy A., Shevkun E., Lysak Y., Plotnikov A. Features of schemes of the explosive loosening, with big slowdowns // *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 192, 01024. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201024

35. Белин В. А., Супрун В. И., Агафонов Ю. Г., Кузнецов В. А. Особенности взрывных работ при добыче алебаstra в водоохранной зоне // *Горный журнал*. – 2017. – № 3. – С. 37–42. DOI: 10.17580/gzh.2017.03.07.

36. Yastrebova K. N., Vladimirovich M. D., Ivanovich C. V., Influence of the nature of the outflow of explosion products from blast holes and boreholes on the efficiency of rock destruction // *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 174, pp. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017.

37. Isheyskiy V., Marinin M., Dolzhikov V. Combination of fracturing areas after blasting column charges during destruction of rocks // *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2019, vol. 12 (12), pp. 2953–2956. 

## REFERENCES

1. Trubetskoy K. N., Galchenko Y. P. Methodology for estimating promising development paradigm for mineral mining and processing industry. *Journal of Mining Science*. 2015, vol. 51, pp. 407–415. DOI: 10.1134/S1062739115020271.

2. Viktorov S. D. The explosive destruction of the rock is the basis of progress in mining. *MIAB. Mining informational and analytical bulletin*. 2015, no. 1, pp. 63–75. [In Russ].
3. Zhang Z. X. *Rock Fracture and Blasting. Theory and Applications*. Elsevier. Butterworth-Heinemann: Amsterdam, The Netherlands. 2016, 528 p.
4. Silva J., Worsley T., Lusk B. Practical assessment of rock damage due to blasting. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 29, pp. 379–385.
5. Monjezi M., Shahriar K., Dehghani H., Namin F. S. Environmental impact assessment of open pit mining in Iran. *Environmental Earth Sciences*. 2008, vol. 58, pp. 205–216.
6. Kim G., Jang J., Kim K. Y., Yun T. S. Characterization of orthotropic nature of cleavage planes in granitic rock. *Engineering Geology*. 2020, vol. 265, 105432. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105432.
7. Sasaoka T., Takahashi Y., Sugeng W., Hamanaka A. Effects of rock mass conditions and blasting standard on fragmentation size at limestone quarries open journal of geology. *Open journal of geology*. 2015, vol. 5, pp. 331–339.
8. Menjulin M. G., Kazmina A. J., Afanasev P. I. Die Einwirkung der Sprengarbeiten auf den Erhaltungszustand des Massivs ausserhalb der Sprengzone mit und ohne Vorspaltenbildung. *Scientific reports on resource issues. Freiberg: International University of Resources*. 2011, vol. 1, pp. 184–187.
9. Sanchidrián J. A., Ouchterlony F., Segarra P., Moser P. Size distribution functions for rock fragments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014, vol. 71, pp. 81–94.
10. Gospodarikov A. P., Vykhodtsev Ya. N., Zatsepin M. A. Mathematical modeling of seismic explosion waves impact on rock mass with a working. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 226, pp. 405–411. [In Russ]. DOI: 10.25515/pmi.2017.4.405.
11. Efremov E. I., Nikiforova V. A. Influence of borehole diameter on the area of contact between explosive and destructible rock and on the yield of fine fractions. *Daily resource energy saving mining technology*. 2012, vol. 2(10), pp. 9–15. [In Russ]
12. Overchenko M. N., Tolstunov S. A., Mozer S. P. Influence of mining-geological conditions and technogenic factors on blastholes stability during open mining of apatite-nepheline ores. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 231, pp. 239–244. [In Russ] DOI: 10.25515/pmi.2018.3.239.
13. Kurchin G. S., Lobatsevich M. A., Petushkova T. A., Efremov P. Yu. Efficiency of application of a bottom hole in wells. *Earth Sciences: yesterday, today, tomorrow: proceedings of the IV international scientific conference (Kazan, may 2018)*. Kazan: Young scientist. 2018, pp. 17–19. [In Russ]
14. Mihail M., Isheyskiy V., Vadim D. Drilling and blasting influence on the process of dust particles formation. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, pp. 97–103.
15. Wang Y., Wang H., Cui C., Zhao B. Investigating Different Grounds Effects on Shock Wave Propagation Resulting from Near-Ground Explosion. *Applied Sciences*. 2019, vol. 9, pp. 1–17. DOI: 10.3390/app9173639.
16. Bukhartsev V. N., Pham N. T. The effect of the structural model on estimating the bearing capacity of the ground base. *Power Technology and Engineering*. 2018, vol. 52(4), pp. 389–394. DOI:10.1007/s10749-018-0963-8.
17. Dipaloke M., Viladkar M. N., Mahendra S. Corrigendum to A multiple-graph technique for preliminary assessment of ground conditions for tunneling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 9(17), pp. 278–286. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.10.010.
18. Khandelwal M., Singh T. H. Evaluation of blast-induced vibration predictors. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2007, vol. 27, iss. 2, pp. 116–125. DOI: 10.1016/j.soildyn.2006.06.004.

19. Öncü M. E., Yön B., Akkoyun Ö., Taşkıran T. Investigation of blast-induced ground vibration effects on rural buildings. *Structural Engineering and Mechanics*. 2015, vol. 54 (3), pp. 545–560. DOI: 10.12989/sem.2015.54.3.545.
20. Koteleva N., Frenkel I. Digital Processing of Seismic Data from Open-Pit Mining Blasts. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, pp. 380–383. DOI: 10.3390/app11010383.
21. Kotikov D. A., Shabarov A. N., Tsirel S. V. Connecting seismic event distribution and tectonic structure of rock mass. *Gornyi Zhurnal*. 2020, vol. (1), pp. 28–32. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05.
22. Roy M. P., Singh P. K., Singh G., Monjezi M. Influence of initiation mode of explosives in opencast blasting on ground vibration. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*. 2007, vol. 116 (1), pp. 1–6. DOI: 10.1179/174328607X161888.
23. Kotikov D. A., Tsirel S. V. Dependence of the distribution of seismic events on the location of geological faults. *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development. Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM*. 2019, pp. 1448–1455.
24. Bormann P. Engdahl E. R., Kind R., Bormann Ed. Seismic wave propagation and Earth models. *New Manual of Seismological Observatory Practice*. Potsdam: German Research Center for Geosciences. 2012, pp. 1–105. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2\_ch2.
25. Koteleva N., Khokhlov S., Frenkel I. Digitalization in Open-Pit Mining: A New Approach in Monitoring and Control of Rock Fragmentation. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11 (22), pp. 1–16. DOI: 10.3390/app112210848.
26. Gendler S. G., Borisovsky I. A. Aerodynamic control in open pit gold mining *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, vol. 2, pp. 99–107. [in Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.
27. Shevkun E., Leshchinsky A., Plotnikov A. Special aspects of explosive loosening with minimal rock displacement. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 192, pp. 1–7. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201003.
28. Heath D. J., Gad E. F., Wilson J. L. Blast Vibration and Environmental Loads Acting on Residential Structures: State-of-The-Art Review. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016, vol. 30 (2), pp. 1–6. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000750.
29. Vasilets V. V., Afanasev P. I., Pavlovich A. A. Safe operation of mining-and-transport system under impact of seismic shot waves. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 1, pp. 26–35. [In Russ] DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-26-35.
30. Leschinsky A. V., Shevkun E. B., Lysak Y. A. The effect of direction of initiation of charges explosives for rock microcracking solid rock. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 2, pp. 50–57. DOI:10.25018/0236-1493-2019-02-0-50-57.
31. Belin V. A., Gorbonos M. G., Astakhov E. O. Influence of primers on blasting efficiency & safety. *Gornyi Zhurnal*. 2019, vol. 7, pp. 63–67. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.12.
32. Fu X., Sheng Q., Zhang Y., Chen J. Application of the discontinuous deformation analysis method to stress wave propagation through a one-dimensional rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015, vol. 80, pp. 155–170. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.09.017.
33. Momeni A., Karakus M., Khanlari G. R., Heidari M. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining*. 2015, vol. 77, pp. 89–96. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.029.
34. Leshchinskiy A., Shevkun E., Lysak Y., Plotnikov A. Features of schemes of the explosive loosening, with big slowdowns. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 192, 01024. DOI: 10.1051/e3sconf/20201920102435.
35. Belin V. A., Suprun V. I., Agafonov Yu. G., Kuznetsov V. A. Features of blasting operations in extraction of alabaster in water protection zone. *Gornyi Zhurnal*. 2017, vol. 3, pp. 37–42. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.03.07.

36. Yastrebova K. N., Vladimirovich M. D., Ivanovich C. V., Influence of the nature of the outflow of explosion products from blast holes and boreholes on the efficiency of rock destruction. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 174, pp. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017.

37. Isheyskiy V., Marinin M., Dolzhikov V. Combination of fracturing areas after blasting column charges during destruction of rocks. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2019, vol. 12 (12), pp. 2953–2956.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Молдован Дмитрий Владимирович* — канд. техн. наук, доцент каф. Взрывное дело, <https://orcid.org/0000-0003-2227-6625>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, Россия, [Moldovan\\_DV@pers.spmi.ru](mailto:Moldovan_DV@pers.spmi.ru);

*Чернобай Владимир Иванович* — канд. техн. наук, доцент каф. Взрывное дело <https://orcid.org/0000-0002-6858-8854>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, [chernobay\\_vi@pers.spmi.ru](mailto:chernobay_vi@pers.spmi.ru)

*Соколов Семен Тарасович* — канд. техн. наук, ассистент каф. Взрывное дело, <https://orcid.org/0000-0003-3153-7874>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, [s175017@stud.spmi.ru](mailto:s175017@stud.spmi.ru);

*Баженова Александра Владимировна* — аспирант каф. Взрывное дело, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, [bazhenova.schura@ya.ru](mailto:bazhenova.schura@ya.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Moldovan D. V.*, Cand. Sci. (Eng.), associate professor Department of Blasting, <https://orcid.org/0000-0003-2227-6625>, St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia, [Moldovan\\_DV@pers.spmi.ru](mailto:Moldovan_DV@pers.spmi.ru);

*Chernobay V. I.*, Cand. Sci. (Eng.), associate professor Department of Blasting, <https://orcid.org/0000-0002-6858-8854>, St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, [chernobay\\_vi@pers.spmi.ru](mailto:chernobay_vi@pers.spmi.ru);

*Sokolov S. T.*, Cand. Sci. (Eng.), assistant Department of Blasting, <https://orcid.org/0000-0003-3153-7874>, St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, [s175017@stud.spmi.ru](mailto:s175017@stud.spmi.ru);

*Bazhenova A. V.*, postgraduate Department of Blasting, St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, [bazhenova.schura@ya.ru](mailto:bazhenova.schura@ya.ru).

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 26.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 26.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

