

Исследования детонационных характеристик эмульсионных взрывчатых веществ, применяемых на железорудных карьерах

В.А. Белин¹✉, Ю.Н. Болотова², М.Г. Горбонос¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
г. Владикавказ, Российская Федерация

✉bvamggu@mail.ru

Резюме: В статье изложены основные тенденции развития взрывных работ при разработке железорудного сырья. Указано, что в связи с тенденцией увеличения массы взрываемых зарядов наблюдается усиление негативного влияния сейсмического действия взрывов на окружающие горные массивы и охраняемые объекты. Для определения эффективных способов снижения сейсмического воздействия на конечный контур карьера и охраняемые объекты был проведен комплекс полигонных исследований детонационных характеристик эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) в условиях железорудных карьеров. В работе показано, что наблюдается процесс затухания детонации удлинённого заряда ЭВВ. Анализ причин обрыва детонации показал, что это может быть связано с нарушением технологии зарядки обводнённых скважин, нарушением технологического процесса при изготовлении ЭВВ, разрушением скважин, возникающим при преждевременном срабатывании соседних скважин, имеющих более поздние серии замедлений. Анализ исследований по изучению детонационных характеристик ЭВВ показал, что вероятность перехода детонации на низкоскоростной режим или выгорание связана с длиной заряда ЭВВ, расстоянием от промежуточного детонатора и возрастает при нижнем (обратном) способе инициирования заряда. Сделан вывод, что для повышения надежности взрывания зарядов ЭВВ необходимо минимизировать длину эмульсионной части заряда и применять комбинированные способы инициирования зарядов ЭВВ.

Ключевые слова: полезные ископаемые, взрывчатые вещества, охраняемые объекты, сейсмическое действие, детонация, эмульсионные взрывчатые вещества, заряд, выгорание заряда, промежуточный детонатор, боевик, окружающая среда

Для цитирования: Белин В.А., Болотова Ю.Н., Горбонос М.Г. Исследования детонационных характеристик эмульсионных взрывчатых веществ, применяемых на железорудных карьерах. *Горная промышленность*. 2022;(1):52–56. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-52-56>

Studies into detonation characteristics of emulsion explosives used in surface mining of iron ores

V.A. Belin¹✉, Yu.N. Bolotova², M.G. Gorbonos³

¹ National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation

² North-Caucasus Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

✉bvamggu@mail.ru

Abstract: The paper outlines the main trends in the development of blasting operations used in iron ore mining. It is pointed out that due to the tendency to raise the weight of blast charges, an increasing negative effect of the seismic blast action is observed on the surrounding rock masses and protected facilities. In order to identify efficient ways to reduce seismic impact on the final pit outline and the protected facilities, a set of field tests was performed on the detonation characteristics of emulsion explosives for the conditions of iron ore open pits. The paper demonstrates that petering-out of detonation is observed for the extended charge of explosives. Analysis of causes for the detonation failure showed that it can be related to non-observance of the technology to charge watered boreholes, failures to meet the technological process when manufacturing the emulsion explosives, blast hole collapses caused by premature firing of the neighboring holes that have bigger delays. Analysis of the research results into the detonation characteristics of emulsion explosives showed that the probability of shifting from detonation to a low-velocity mode or deflagration is related to the length of the emulsion charge, the distance from the booster and probability is increasing at the lower (reverse) method of firing the charge. It is concluded that in order to increase the reliability of detonation of the emulsion explosives it is required to minimize the length of the emulsion part of the charge and to use combined firing methods of the blast charges.

Keywords: useful minerals, explosives, protected facilities, seismic action, detonation, emulsion explosives, charge, deflagration, booster, primer, environment

For citation: Belin V.A., Bolotova Yu.N., Gorbonos M.G. Studies into detonation characteristics of emulsion explosives used in surface mining of iron ores. *Russian Mining Industry*. 2022;(1):52–56. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-52-56>

Введение

Разработка твердых полезных ископаемых невозможна без применения динамических геотехнологий, связанных с ведением буровзрывных работ. В связи с тенденцией увеличения массы взрываемых зарядов наблюдается усиление негативного влияния сейсмического действия взрывов на окружающие горные массивы и охраняемые объекты.

Сейсмическое проявление действия взрыва на окружающую среду в основном сказывается на обнажениях уступов, на которых ведутся горные работы, и на тех, на которых горные работы уже завершены [1–4]. А также этому воздействию подвергаются различные охраняемые здания и сооружения. Незначительному воздействию могут подвергаться и другие участки карьера, и населенные пункты, находящиеся вблизи проводимых массовых взрывов. При даже незначительных скоростях сейсмических волн они могут ощущаться и вносить дискомфорт в жизнь граждан [5–7].

Необходимо отметить, что массовые взрывы зарядов промышленных взрывчатых веществ приводят к образованию трещин в окружающем массиве горных пород и в законтурном пространстве, в котором добычные горные работы прекращены. При этом массив ослабляется и становится склонным к обрушению, что может приводить к аварийным проявлениям горного массива. Для снижения этих проявлений рекомендуется применять ВВ с пониженным дробящим действием, что часто позволяет исключить трещинообразование в зоне погашения и снизить интенсивность проявления взрывных работ. Снижение воздействия сейсмических волн на окружающую среду может достигаться различными способами, но особые сложности проявляются в крепких и особо крепких породах, к которым относятся железистые кварциты, диабазы и диабазовые порфириты.

Для определения эффективных способов снижения сейсмического воздействия на конечный контур карьера и охраняемые объекты был проведен комплекс полигонных исследований детонационных характеристик эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) в условиях железорудных карьеров.

Методы и результаты исследований

Детонационные характеристики эмульсионных скважинных зарядов ВВ играют важную роль в обеспечении заданного качества взорванной горной массы и обеспечении промышленной безопасности взрывных работ.

Исследования [8] показали, что отклонение срабатывания от номинала средств инициирования и неустойчивая детонация удлиненных зарядов ЭВВ могут приводить к существенному отклонению параметров сейсмических волн от расчетных значений и вызывать усиление воздействия на законтурный массив и охраняемые объекты.

Наши исследования на карьерах ОАО «Карельский окатыш», АО «Лебединский ГОК» и АО «Михайловский ГОК» показали [9], что наблюдается процесс затухания детонации удлиненного заряда ЭВВ. При этом исследовались скорости детонации ВВ по длине скважин, концентрации вредных газов в воздухе на месте взрыва, велась видеосъемка проводимых взрывов и фотосъемка развалов взорванной породы. Для измерений был выбран рефлектометрический измеритель скорости детонации марки TLC SpeedVOD производства компании Vibronics Inc. (США). Этот измеритель использует протяженный датчик в виде радиочастотного коаксиального кабеля, например, марок РК-75-4-651,

РК-75-3-322. Общее время одной записи измерений может достигать 25600 мс (большинство измерений проводилось при 1280 мс), что даёт возможность проводить измерения скоростей детонации во многих скважинах за один взрыв. Дискретность между точками измерений регулируется в широком диапазоне – от 0,005 мс до 0,1 мс. Для всех измерений была выбрана единая дискретность 0,005 мс, позволяющая получать около 50 точек измерений на каждый метр скважины, при этом расстояние между точками измерений составляло около 2 см, что обеспечило высокую информативность и достоверность измерений.

С помощью программного обеспечения измерителя из полученного массива исключаются шумы и выбросы, возникающие в результате сейсмических воздействий на кабель и измеритель, и производится выделение данных движения фронта детонации по каждой отдельной скважине (около 400 точек измерений на скважину).

Для численной оценки значений скорости детонации в различных частях скважины, каждая скважина разбивается на три части – донную, серединную и приустьевую. Донная часть, начинающаяся с уровня боевика и поднимающаяся вверх на 3 м, выделяется по той причине, что в ней происходят нестационарные процессы (замедление или разгон детонации), обусловленные воздействием боевика. Приустьевая часть, начинающаяся на границе забойки с зарядом и опускающаяся от неё вниз на 3 м, выделяется по причине возможных нарушений строения пород и трещин в этой зоне, нарушений состава и однородности ЭВВ, а также вследствие близости открытой границы заряда. Все эти факторы могут приводить к изменениям скорости детонации. Серединная часть располагается между донной и приустьевой частями, если между ними остаётся достаточное расстояние (при короткой скважине с высоко поднятым боевиком серединной части может не быть). Каждая из трёх частей делится на три равных участка, для каждого участка производится усреднённый пересчёт длин кабеля в скорости. Полученные значения скорости детонации для каждого из девяти участков сводятся в таблицу, приводимую в таблице для каждой скважины. Пример такой записи процесса полной детонации заряда ЭВВ «Эмунекс-7000», инициированной двумя боевиками ПТ-П-500, приведен на рис. 1. Анализ скоростей детонации по длине заряда показан в табл.1.

Также для каждой скважины приводится график зависимости скорости детонации по длине скважины. Для этого

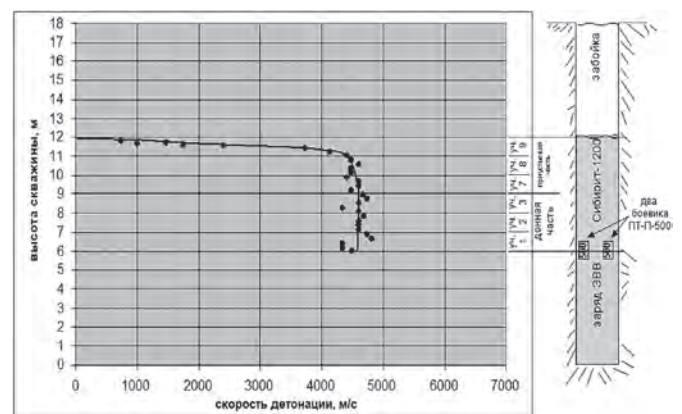


Рис. 1
График изменения скорости детонации по длине скважины

Fig. 1
Chart of the detonation velocity change along the length of the blast hole

БУРОВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ

Drilling and blasting operations

зависимость длины кабеля от времени (первичные данные) усредняется до примерно 30–50 точек измерений, в этих точках вычисляются средние значения скоростей, и с помощью программы Microsoft Office Excel строится наглядный график изменения скорости детонации по скважине. Всего были проведены измерения детонационных характеристик более 120 скважинных зарядов разных марок ЭВВ при различных параметрах их инициирования.

Таблица 1
Скорость детонации в разных частях скважины

Часть скважины	Номер участка	Скорость детонации, м/с
Приустьевая	уч.9	2450
	уч.8	4500
	уч.7	4547
Донная	уч.3	4587
	уч.2	4620
	уч.1	4538

Table 1
Detonation velocity in different parts of the blast hole

Таблица 2
Скорость детонации в разных частях скважины

Часть скважины	Номер участка	Скорость детонации, м/с
Приустьевая	уч.9	Выброс или выгорание
	уч.8	Выброс или выгорание
	уч.7	Выброс или выгорание
Срединная	уч.6	Выброс или выгорание
	уч.5	Выброс или выгорание
	уч.4	Выброс или выгорание
Донная	уч.3	2205
	уч.2	4900
	уч.1	4850

Table 2
Detonation velocity in different parts of the blast hole

Средняя скорость детонации для текущих условий взрывания наиболее корректно определяется путём усреднения скоростей на участках 2, 3, 7 и составляет 4585 м/с.

После инициирования заряда боевиками на высоте 6 м вверх по заряду начала распространяться детонация с нормальной скоростью. В конце заряда на участке 9 приустьевой части скорость детонации начала падать и при приближении к окончанию заряда детонация прекратилась, что является нормальным. Весь заряд детонировал с устойчивой скоростью.

Однако такая картина стационарного течения детонации наблюдается не всегда. На рис. 2 показан пример частичного выгорания заряда ЭВВ «Эмунекс-7000». Анализ скоростей детонации по длине такого заряда показан в табл. 2.

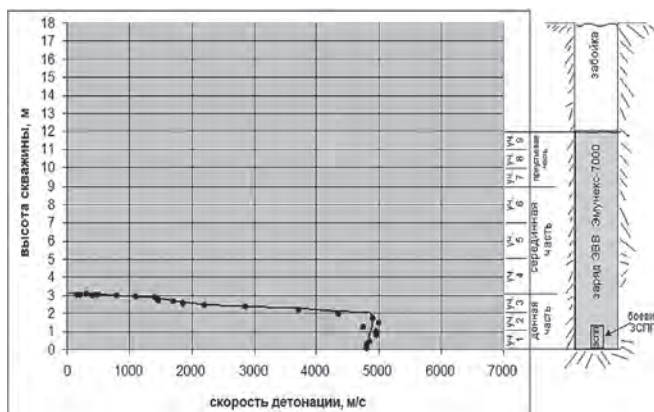


Рис. 2
График изменения скорости детонации по длине скважины

Fig. 2
Chart of the detonation velocity change along the length of the blast hole

Средняя скорость детонации для текущих условий взрывания наиболее корректно определяется путём усреднения скоростей на участке 2 и составляет 4900 м/с.

После инициирования заряда боевиком на высоте 0 м (дно скважины) вверх по заряду начала распространяться детонация с устойчивой скоростью. На высоте от 2,2

до 2,9 м произошли падение скорости и обрыв детонации, оставшаяся часть заряда (участки 4–9) выгорела либо была выброшена из скважины. Детонировал с устойчивой скоростью участок только от 0,0 до 2,9 м (24% массы) заряда.

Статистика измерений и случаев обрыва детонации зарядов. Анализ результатов исследований

Всего при испытаниях удалось измерить скорость детонации зарядов в 132 скважинах. При этом во многих скважинах наблюдались обрывы детонации зарядов, при которой возбуждённая промежуточным детонатором (боевиком) устойчивая детонация, пройдя некоторую часть заряда, прекращалась, а оставшаяся часть заряда выгорала либо выбрасывалась из скважины. Обрывы детонации наблюдались в 69% скважин, при этом потеряно (не детонировало) 30,5% от общей массы использованных зарядов, в которых проводились измерения. В 34% случаев обрыв детонации наблюдался в срединной части заряда, в 22% в донной части и в 13% в приустьевой части.

Обрывы детонации и выгорание зарядов ЭВВ зафиксированы также при видеофиксации массовых взрывов на железорудных карьерах (рис. 3).

Анализ причин обрыва детонации показал, что это может быть связано с нарушением технологии зарядки обводнённого



Рис. 3
Пример выгорания зарядов ЭВВ на АО «Карельский окатыш» (Костомукшский ГОК)

Fig. 3
Example of emulsion explosive deflagration at Karelskiy Okatysh JSC (Kostomuksha Integrated Mining and Processing Works)

ных скважин, нарушением технологического процесса при изготовлении ЭВВ, разрушением скважин, возникающим при преждевременном срабатывании соседних скважин, имеющих более поздние серии замедлений. Однако исследования [10; 11] показали, что «при оценке устойчивости распространения детонации в скважинном заряде ЭВВ расчет детонационных параметров ЭВВ необходимо осуществлять, учитывая как рецептурный состав, плотность эмульсии, плотность ЭВВ, радиус сенсibiliзирующих пор, так и размер частиц дисперсной фазы эмульсии, а также параметры иницирующего воздействия». В работе [12] установлено, что стационарный детонационный процесс происходит, когда происходит образование ячеистой структуры детонационного фронта, а обрыв детонации или переход на низкоскоростной режим детонации ЭВВ с газовыми порами связаны с разрушением ячеистой структуры. При этом экспериментально установлено, что исчезают детонационные процессы в поперечном направлении. Это приводит к снижению температуры в зоне реакции и замедлению химических процессов. Это обуславливает резкое возрастание критического диаметра заряда ЭВВ. В результате возникают предпосылки перехода детонации на низкоскоростные режимы или даже обрыв детонации.

Кроме того, установлено [13–15], что нарушение стационарного развития детонации ЭВВ связано с образованием отраженных от стенок скважины детонационных волн разряжения. Особенно это явление распространено при взрывании крепких горных пород, к которым относятся железистые кварциты.

Анализ исследований, изложенных выше, по изучению детонационных характеристик ЭВВ показал, что вероятность перехода детонации на низкоскоростной режим или выгорание связана с длиной заряда ЭВВ, расстоянием от промежуточного детонатора и возрастает при нижнем (обратном) способе иницирования заряда.

Заключение

Проведенные исследования показали, что для скважин диаметром 140–295 мм при увеличении расстояния от промежуточного детонатора (при нижнем иницировании) более 35–45 диаметров заряда ЭВВ вероятность затухания детонации резко возрастает и может достигать 45–55%. Следовательно, для повышения надежности взрывания зарядов ЭВВ необходимо минимизировать длину эмульсионной части заряда и применять комбинированные способы иницирования зарядов ЭВВ.

Список литературы

1. Аленичев И.А. Реакция массива горных пород в карьерном пространстве на динамические воздействия при производстве взрывных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(7):189–195. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-0-189-195>
2. Совмен В.К., Кутузов Б.Н., Марьясов А.Л., Эквист Б.В., Токаренко А.В. *Сейсмическая безопасность при взрывных работах*. М.: Горная книга; 2002. 228 с.
3. Цибаев С.С., Ренев А.А., Позолотин А.С., Мефодьев С.Н. Оценка влияния динамических сейсмических воздействий на устойчивость подземных горных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(2):101–111. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-2-0-101-111>
4. Segarra P., Sanchidrián J.A., Castedo R., López L.M., Del Castillo I. Performance of some coupling methods for blast vibration monitoring. *Journal of Applied Geophysics*. 2015;112:129–135. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.11.012>
5. Kumar R., Choudhury D., Bhargava K. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016;8(3):341–349. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.009>
6. Gui Y.L., Zhao Z.Y., Jayasinghe L.B., Zhou H.Y., Goh A.T.C., Tao M. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;101:63–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.11.016>
7. Тюпин В.Н. *Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах*. Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ»; 2017. 192 с.
8. Белин В.А., Горбонос М.Г., Митков В.Е. Влияние качества взрывчатых веществ и средств иницирования на эффективность дробления горной массы взрывом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(S1):72–80.
9. Белин В.А. (ред.) *Методы ведения взрывных работ*. Специальные взрывные работы. М.: МГТУ; 2007. 563 с.
10. Горинов С.А., Кутузов Б.Н. О неустойчивости детонационных волн в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсibiliзированном газовыми порами. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(4):302–307.
11. Горинов С.А., Маслов И.Ю. Особенности распространения детонационной волны в ЭВВ. *Взрывное дело*. 2017;(117/74):146–156.
12. Горинов С.А., Маслов И.Ю. Анализ устойчивости детонационной волны при ее распространении в ЭВВ, сенсibiliзированном газовыми порами. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(5):241–254. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2017/5/241_254_5_2017.pdf
13. Кутузов Б.Н., Горинов С.А. Физико-технические основы создания эмульсионных и гранулированных ВВ и средств их иницирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(3):34–52.
14. Dam T.T., Tran V.D., Tran D.V., To D.T. Study on the reasonable parameters of the cylinder-shaped charge with tapered liner funnel to destroy stone. In: *International symposium on rock mechanics and engineering. The 35th VSRM anniversary ISRM 2019 specialized conference, 22–24 Nov. 2019*. Hanoi; 2019, pp. 118–130.
15. Gui Y.L., Zhao Z.Y., Jayasinghe L.B., Zhou H.Y., Goh A.T.C., Tao M. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;101:63–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.11.016>

References

1. Alenichev I.A. Rock mass response to dynamic effect of blasting in the area of open pit mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(7):189–195. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-0-189-195>
2. Sovmen V.K., Kutuzov B.N., Mar'yasov A.L., Ekvist B.V., Tokarenko A.V. *Seismic safety in blasting operations*. Moscow: Gornaya kniga; 2002. 228 p. (In Russ.)
3. Tsibaev S.S., Renev A.A., Pozolotin A.S., Mefodiev S.N. Assessment of seismic impacts on stability of openings in underground mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(2):101–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-2-0-101-111>
4. Segarra P., Sanchidrián J.A., Castedo R., López L.M., Del Castillo I. Performance of some coupling methods for blast vibration monitoring. *Journal of Applied Geophysics*. 2015;112:129–135. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.11.012>
5. Kumar R., Choudhury D., Bhargava K. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016;8(3):341–349. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.009>
6. Gui Y.L., Zhao Z.Y., Jayasinghe L.B., Zhou H.Y., Goh A.T.C., Tao M. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;101:63–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.11.016>
7. Tyupin V.N. *Blasting and geomechanical processes in fractured stressed rock masses*. Belgorod: Belgorod State University; 2017. 192 p. (In Russ.)
8. Belin V.A., Gorbonos M.G., Mitkov V.E. Influence of the quality of explosives and initiating systems on the efficiency of rock crushing by the explosion. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(S1):72–80. (In Russ.)
9. Belin V.A. (ed.) *Methods of blasting operations. Special blasting operations*. Moscow: Moscow State Mining University; 2007. 563 p. (In Russ.)
10. Gorinov S.A., Kutuzov B.N. On instability of the detonation waves in emulsion explosives sensitized by gas pores. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;(4):302–307. (In Russ.)
11. Gorinov S.A., Maslov I.Yu. Specific features in propagation of the detonation wave inside the emulsion explosives. *Vzryvnoe delo*. 2017;(117/74):146–156. (In Russ.)
12. Gorinov S.A., Maslov I.Yu. Analysis of stability of detonation wave in emulsion explosive sensitized by gas pockets (bubbles). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(5):241–254. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2017/5/241_254_5_2017.pdf
13. Kutuzov B.N., Gorinov S.A. Physical and technical background for creation of emulsion and granular explosives and their primers. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(3):34–52. (In Russ.)
14. Dam T.T., Tran V.D., Tran D.V., To D.T. Study on the reasonable parameters of the cylinder-shaped charge with tapered liner funnel to destroy stone. In: *International symposium on rock mechanics and engineering. The 35th VSRM anniversary ISRM 2019 specialized conference, 22–24 Nov. 2019*. Hanoi; 2019, pp. 118–130.
15. Gui Y.L., Zhao Z.Y., Jayasinghe L.B., Zhou H.Y., Goh A.T.C., Tao M. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;101:63–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.11.016>

Информация об авторах

Белин Владимир Арнольдович – доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; Президент АНО «Национальная организация инженеров-взрывников России», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: bvamggu@mail.ru

Болотова Юлия Николаевна – аспирант, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Российская Федерация

Горбонос Михаил Григорьевич – доцент кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.01.2022
 Поступила после рецензирования: 23.02.2022
 Принята к публикации: 25.02.2022

Information about the authors

Vladimir A. Belin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Physical Processes of Mining Operations and Geo-control, National University of Science and Technology “MISIS”; President, National Organization of Russian Explosive Engineers’ Autonomous Non-Profit Organization, Moscow, Russian Federation; e-mail: bvamggu@mail.ru

Yulia N. Bolotova – Postgraduate Student, North-Caucasus Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

Mikhail G. Gorbonos – Associate Professor, Department of Physical Processes of Mining Operations and Geo-control, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

Article info

Received: 30.01.2022
 Revised: 23.02.2022
 Accepted: 25.02.2022