

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.235

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-94-100

УТОЧНЕНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ СКВАЖИННОЙ ЗАБОЙКИ

Галимьянов Алексей Алмазович
Казарина Елизавета Николаевна

Институт горного дела ДВО РАН

* для корреспонденции: azot-1977@mail.ru



Информация о статье

Поступила:

05 июня 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 апреля 2025 г.

Принята к публикации:

30 апреля 2025 г.

Опубликована:

11 июня 2025 г.

Ключевые слова:

забойка скважин, удельный межскважинный интервал замедления, скорость детонации, скорость распространения продольной волны, горный массив, длина заряда, буровзрывные работы, экспериментальный взрыв.

Аннотация.

В настоящее время на открытых горных работах уникальным и практически единственным высокоэффективным способом подготовки скальных пород к выемке является их разрушение энергией взрыва. Забойка скважин является одной из составляющих конструкции скважинных зарядов. В статье приводится обоснование актуальности забойки скважин в зависимости от параметров буровзрывных работ и свойств горного массива посредством проведения производства экспериментальных взрывов на открытых горных работах. В целях уточнения актуальности забойки скважин на разрезе «Буреинский-2» АО «Ургалуголь» и «Маломырском руднике» ГК «Атлас Майнинг» проведена серия опытно-промышленных взрывов, где были зафиксированы основные данные исследуемых блоков (производительность экскаватора, глубина скважин, длина заряда и недозаряда скважин, скорость детонации заряда ВВ, вычислена скорость продольной волны в горном массиве). Исследования показали, что применение забойки становится менее эффективным при определенных условиях, а именно при балансе факторов – увеличении скорости распространения продольных волн в горном массиве, снижении скорости детонации заряда взрывчатого вещества, уменьшении длины свободной от заряда верхней части скважины, увеличении длины верхней части столба заряда, начиная от места установки боевика, и удельного интервала замедления по диагонали сетки скважин, равного или превышающего 4,9 м/м. На основании проведенных экспериментов установлено, что при удельном диагональном интервале замедления 4,9 м/м и выше эффективность забойки снижается, особенно если коэффициент эффективности забойки ($n_{эз}$) превышает единицу. Для определения целесообразности использования забойки необходимо учитывать различные горно-геологические условия и параметры буровзрывных работ. В ходе работы получена зависимость производительности экскаватора от показателя эффективности забойки.

Для цитирования: Галимьянов А.А., Казарина Е.Н. Уточнение актуальности скважинной забойки // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 2 (168). С. 94-100. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-94-100, EDN: QQDQGC

Введение

Забойка скважин инертным материалом способствует повышению длительности воздействия давления продуктов взрыва на стенки зарядной скважины, а соответственно, и передачи энергии взрывчатого вещества (ВВ) в горный массив. Следовательно, физической

основой управления энергией взрыва при забойке скважин является управление временем передачи энергии продуктов детонации окружающей среде [1-2].

Многие исследователи [3-4] придерживаются мнения о положительном эффекте применения забойки. Другие утверждают обратное, к

примеру, имеются исследования бывшего ИГД Минчермета СССР, согласно которым забойка не влияет существенно ни на качество дробления породы, ни на разлет кусков породы [5], что подтверждается современными исследованиями дальневосточных ученых на основе эффекта увеличенных интервалов замедлений [6]. Сложности с производством возникают при ведении БВР в условиях криолитозоны, при смерзании бурового шлама и проблемах с наличием забоечного материала, что требует специального подхода к обоснованию эффективности и безопасности применения забойки.

На шахтах и рудниках, опасных по газу и пыли, исходя из условия обеспечения их безопасности, взрывание без забойки запрещено. На открытых горных работах забойка скважин и шпуров не является обязательным элементом. Наиболее высокие качества имеет крупнозернистая забойка с зернами высокой плотности, в которой воздух, содержащийся между зернами, придает ей высокую сжимаемость [7-11]. Из физических соображений

можно предположить, что наиболее высокий запирающий эффект имеет смесь утяжеленной жидкости с пузырьками воздуха [8, 12]. Близкий к такому физическому состоянию материал может быть создан при взрыве внутри столба жидкости или обычной хорошо сжимаемой забойки одного-двух небольших зарядов ВВ [9], что позволяет надежно запирать продукты взрыва, истекающие через устье скважины, и повышать общую продолжительность их действия [13].

Физически действие забойки необходимо до тех пор, пока стенкам зарядной камеры и забойке, как инертной среде, будет передан весь импульс взрыва. Обычно импульс взрыва сообщается статичной среде за весьма короткий интервал времени, определяемый временем пробега по заряду волны разряжения, отраженной от стенок зарядной камеры и торца заряда, примыкающего к забойке [1]. В то же время волна разряжения может пройти по заряду и в том случае, когда зарядная камера сообщается с открытой поверхностью серией распространяющихся трещин. Тогда при длине

Таблица 1. Основные показатели исследуемых блоков
Table 1. Main indicators of the studied blocks

Производительность, экскаватор а м ³ /сут (без забойки)	Производительность, экскаватор а м ³ /сут (с забойкой)	Глубина, м скважины	Длина заряда в скважине, м	Длина верхней части столба заряда считая от места установки боевика, м	Скорость детонации заряда ВВ, км/сек	Длина свободной от заряда верхней части скважины, м	Скорость продольной волны в горном массиве, км/сек	Показатель эффективности забойки
P_z	P_z	L	l_z	$l_{вчз}$	D	l_n	C_p	$n_{э.з.}$
<i>р. Буреинский, ЭВВ НППМ-70</i>								
5531	6804	17	13	2	5	4	3,5	0,35
6069	6901	17	13	4	5	4	3,5	0,70
6783	7032	17	13	6	5	4	3,5	1,05
6863	7003	17	13	8	5	4	3,5	1,40
7003	6857	17	13	10	5	4	3,5	1,75
<i>р. Буреинский, Гранулит М</i>								
5674	6935	17	13	2	3,4	4	3,5	0,51
6531	6835	17	13	4	3,4	4	3,5	1,03
6931	6753	17	13	6	3,4	4	3,5	1,54
6869	6802	17	13	8	3,4	4	3,5	2,06
6951	7013	17	13	10	3,4	4	3,5	2,57
<i>"Маломырский рудник", ЭВВ-Нитронит-Э70</i>								
5588	6931	17	13	2	5	4	5	0,50
6589	6775	17	13	4	5	4	5	1,00
6693	6835	17	13	6	5	4	5	1,50
6731	6888	17	13	8	5	4	5	2,00
6721	6779	17	13	10	5	4	5	2,50
<i>"Маломырский рудник", Гранулит-РП</i>								
5744	6783	17	13	2	3,4	4	5	0,74
6713	6554	17	13	4	3,4	4	5	1,47
6595	6701	17	13	6	3,4	4	5	2,21
6573	6635	17	13	8	3,4	4	5	2,94
6622	6559	17	13	10	3,4	4	5	3,68

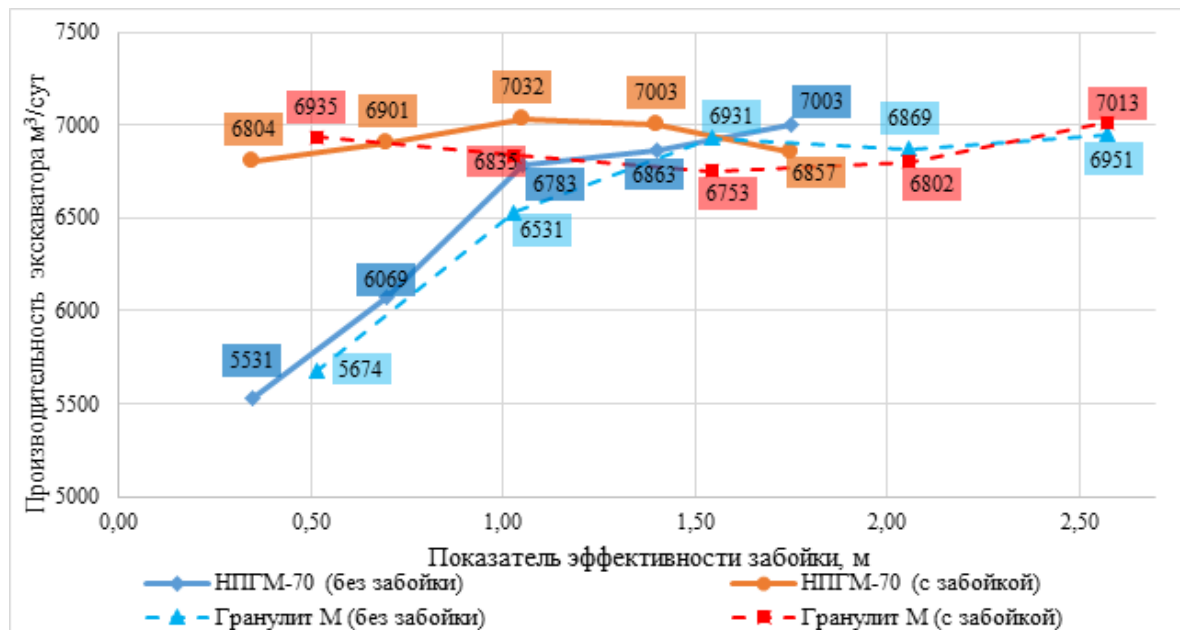


Рис. 1. График зависимости производительности экскаватора от показателя эффективности забойки на р. Буреинский

Fig. 1. Graph of the dependence of excavator productivity on the indicator of the efficiency of cutting at the Bureinsky open-pit mine

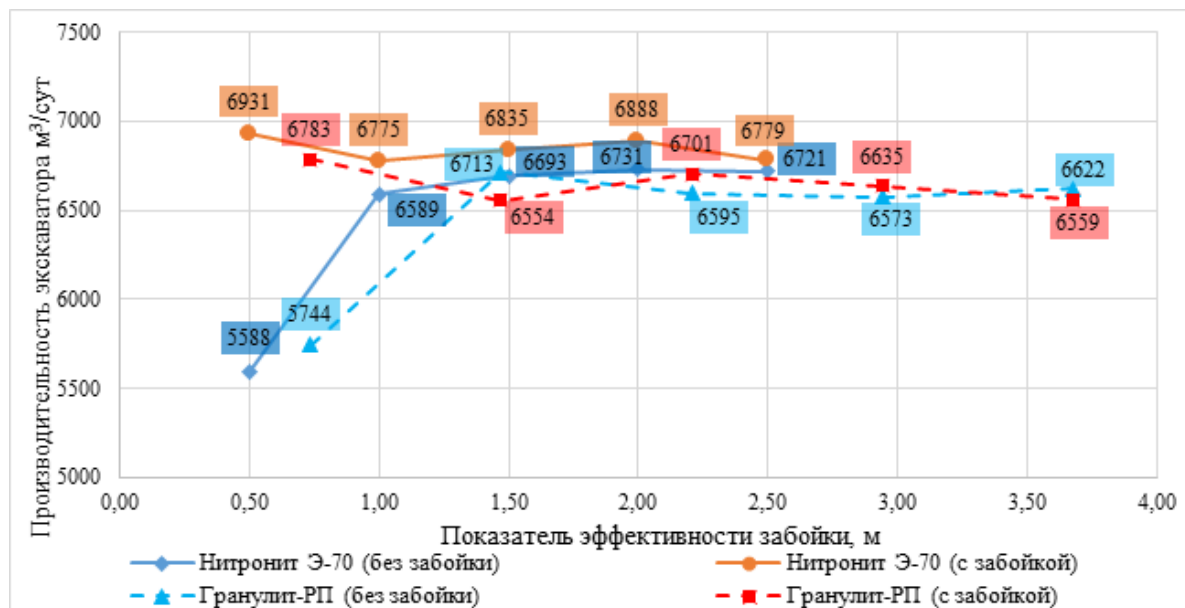


Рис. 2. График зависимости производительности экскаватора от показателя эффективности забойки на Маломырском руднике

Fig. 2. Graph of the dependence of excavator productivity on the indicator of mining efficiency at the Malomyrsky mine

детонирующего заряда l_z , скорости волны разряжения – $D/2$ (где D – скорость детонации заряда ВВ), скорости роста трещин в предельно режиме их распространения, близкой к скорости волны Релея, $v_{тр} = 0,5C_p$ (где C_p – скорость продольной волны в массиве) и расстояния от заряда до открытой поверхности l_n получаем, что условие [1], при котором обязательно произойдет

разгрузка продуктов детонации, может быть представлено как (1):

$$\frac{l_z}{D/2} = \frac{l_n}{0,5C_p} \quad (1)$$

Следовательно, при

$$l_z \geq \frac{Dl_n}{C_p}, \text{ м} \quad (2)$$

забойка может не применяться, так как при этом давление в продуктах детонации скорее падает

от их сообщения с атмосферой по серии развивающихся трещин, чем по стволу скважины. Во всех остальных случаях забойка необходима, особенно из условий безопасного ведения работ.

Учитывая вышесказанное, есть основания полагать, что обоснование применения забоечного материала при ведении буровзрывных работ на конкретных горнодобывающих предприятиях на современном этапе развития технологий является неотъемлемой частью повышения эффективности и качества разрушения горной массы.

Методика исследований

В выражении (2) целесообразно внести уточнение, а именно вместо длины заряда l_z применить $l_{вчз}$ – длина верхней части заряда, считая от места установки боевика, т. к. боевик может быть установлен в любой части заряда, и ввести показатель эффективности забойки – $n_{эз}$, равный отношению (3):

$$n_{эз} = l_{вчз} / \frac{Dl_n}{C_p} \quad (3)$$

В целях уточнения актуальности забойки скважин на разрезе «Буреинский-2» АО «Ургалуголь» и «Маломырском руднике» [14] ГК «Атлас Майнинг» проведена серия опытно-промышленных взрывов, где были выявлены зависимости взрывания скважин с забойкой и без нее при параметрах буровзрывных работ (БВР), отличающихся высотой уступа, с учетом положительного опыта применения увеличенных интервалов замедлений, обоснованного в работах [6, 15-16]. При этом относительная изотропность массива обеспечивалась проведением экспериментальных взрывов на одном горизонте, относительно уровня подошвы уступа.

В процессе проведения экспериментов, подтверждена неэффективность забойки (Таблица 1, Рис. 1-2) при условии (4):

$$n_{эз} > 1 \quad (4)$$

Обсуждение результатов

Также неэффективность забойки при условии (4) $n_{эз} > 1$ подтверждается экспериментами, проводимыми сотрудниками ИГД ДВО РАН в 2023 году на «Маломырском руднике» [14, 17], в ходе экспериментов блок делился на две части, одна с применением забойки из щебня фракцией 15-30 мм, вторая без применения забойки скважин. В процессе работы были составлены и проанализированы графики отношения высоты выброса пылегазового облака к времени и интервальной скорости выброса пылегазовых продуктов детонации ВВ, по которым предварительно можно сделать вывод о том, что существенной разницы между качеством ВГМ блока с применением забойки и блока без применения забойки не выявлено. Для чистоты эксперимента дополнительно проведена оценка производительности погрузки ВГМ в

автосамосвалы. Результаты данного эксперимента также совпадают с условием (4).

Выводы

Методом проведения экспериментов уточнено, что актуальность забойки скважины снижается при следующих условиях:

- увеличении скорости распространения продольной волны в горном массиве;
- снижении скорости детонации заряда взрывчатого вещества;
- уменьшении длины свободной от заряда верхней части скважины;
- увеличении длины верхней части столба заряда, считая от места установки боевика,
- удельном интервале замедления по диагонали сетки скважин, равном или более 4,9 мс/м.

Посредством проведения экспериментов на горных предприятиях показана неэффективность применения забойки при удельном диагональном интервале замедления, равном 4,9 мс/м и более, при условии, что коэффициент эффективности забойки $n_{эз}$ больше единицы.

Целесообразно продолжение исследований в данном направлении в разных горно-геологических условиях и параметрах БВР для уточнения приведенных в работе зависимостей.

На каждом горном предприятии, не опасном по газу и пыли, применять или не применять забойку, решает главный инженер на основе опыта, при обязательном анализе результатов промышленных экспериментальных взрывов с разной конструкцией скважинных зарядов, в том числе забойки. Выполнение опытных взрывов в целях повышения чистоты эксперимента рекомендуется при соблюдении следующих основных условий:

1. Разделение экспериментального взрывного блока на две сравнимые части с отличающимся параметром;
2. Объем экспериментального блока должен быть как можно меньше для повышения эффекта изотропности горного массива;
3. В качестве взрывчатого вещества применение простейшего типа АС-ДТ или патронированных ЭВВ заводского изготовления, так как наливные ЭВВ, приготавливаемые на местах ведения горных работ, могут давать неприемлемые отклонения для качества эксперимента в части изменения полноты детонации в худшую сторону;
4. При применении наливных ЭВВ обязательно включение в эксперимент процедуры измерения скорости детонации скважинного заряда ЭВВ;
5. Фиксация параметров разлета осколков горной массы от взрыва посредством видеокамеры с повышенной кадровой частотой – 32-200 кадров в секунду (ускоренная съемка) или 200-10000 кадров в сек. (скоростная съемка).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М. : Недра, 1976. 270 с.
2. Молдован Д. В., Чернобай В. И., Соколов С. Т., Баженова А. В. Конструктивные решения запираания продуктов взрыва во взрывной полости // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6–2. С. 5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_5.10:20.
3. Курчин Г. С. [и др.] Эффективность применения забойки в скважинах // Сб. науч. тр. Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: IV Международной научной конференции, 460 Казань, 20–23 мая 2018 года. Казань : Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Молодой ученый», 2018. С. 17–19.
4. Вохмин С. А., Курчин Г. С., Кирсанов А. К. Процесс разрушения породы при взрыве заряда взрывчатого вещества // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 11(126). С. 10–22.
5. Кутузов Б. Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом: учеб. для вузов. М.: Издательство «Горная книга», 2007. 471 с.
6. Шевкун Е. Б., Лещинский А. В., Лысак Ю. А., Плотноков А. Ю. Особенности взрывного рыхления при увеличенных интервалах замедления // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 4. С. 272–282.
7. Шевкун Е. Б. [и др.] Короткая комбинированная забойка взрывных скважин высокой запирающей способности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 331–336.
8. Лещинский А. В., Шевкун Е. Б. Влияние конструкции забойки взрывных скважин на снижение выхода негабаритных кусков горной массы // Проблемы недропользования. 2020. №1(24). С. 93–102. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.01.093.
9. Лещинский А. В., Шевкун Е. Б. Забойка взрывных скважин на карьерах. Федеральное агентство по образованию, Тихоокеанский государственный университет. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2008. 230 с.
10. Демидюк Г. П. [и др.] Влияние забойки на степень дробления горных пород взрывом // Взрывное дело. № 53/10. М. : Недра, 1963. С. 96–105.
11. Sasaoka T., Takahashi Y., Sugeng W., Hamaoka 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.
12. Катанов И. Б., Скачилов П. Г. Обоснование рациональной производительности устройства для пеногелевой забойки // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 4(116). С. 64–71.
13. Горинов С. А., Норов Ю. Д., Тухташев А. Б. Схема работы активной забойки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 5. С. 128–131.
14. Казарина Е. Н. [и др.] Обоснование эффективности применения забойки на карьере «Маломырский рудник» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 4. С. 413–423.
15. Шевкун Е. Б. [и др.] Особенности производственных испытаний комбинированных забоек взрывных скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 4. С. 97–107.
16. Митюшкин Ю. А., Лысак Ю. А., Плотноков А. Ю., Ружицкий А. В., Шевкун Е. Б., Лещинский А. В. Оптимизация параметров взрывных работ увеличением интервалов замедления // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 4. С. 341–348.
17. Галимьянов А. А. [и др.] Эффективность применения забойки на карьере «Маломырский рудник» // Горный журнал. 2024. № 6. С. 61–64.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Галимьянов Алексей Алмазович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дробления горных пород Института горного дела ДВО РАН, обособленное подразделение Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН, (680000, Россия, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51), <https://orcid.org/0000-0002-8003-7502>, e-mail: azot-1977@mail.ru

Казарина Елизавета Николаевна, младший научный сотрудник лаборатории дробления горных пород Института горного дела ДВО РАН, обособленное подразделение Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН, (680000, Россия, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51), <https://orcid.org/0009-0006-6701-0934>, e-mail: kazarinaen@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Галимьянов Алексей Алмазович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, составление методологии, проведение исследования, формальный анализ, проверка.

Казарина Елизавета Николаевна – анализ тематической литературы, проведение исследования, формальный анализ, редактирование, проверка.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

CLARIFICATION OF THE FORMULA FOR THE RELEVANCE OF WELL COLLECTION

Alexey A. Galimyanov
Elizaveta N. Kazarina

Institute of Mining, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

* for correspondence: azot-1977@mail.ru



Article info

Received:

05 June 2024

Accepted for publication:

22 April 2025

Accepted:

30 April 2025

Published:

11 June 2025

Keywords: drilling of wells, specific inter-well deceleration interval, detonation speed, velocity of propagation of a longitudinal wave, rock mass, charge length, drilling and blasting operations, experimental explosion.

Abstract.

Currently, in open-pit mining, the unique and virtually the only highly effective method of preparing rock for extraction is their destruction by blast energy. Borehole tamping is one of the components of the borehole charge design. The article provides a rationale for the relevance of borehole tamping depending on the parameters of drilling and blasting operations and the properties of the rock mass by conducting experimental blasts in open-pit mining. In order to clarify the relevance of borehole tamping, a series of pilot blasts were carried out at the Bureinsky-2 open-pit mine of Uralugol JSC and the Malomirsky mine of Atlas Mining Group of Companies, where the main data of the studied blocks were recorded (excavator productivity, borehole depth, charge length and undercharge of boreholes, detonation velocity of the explosive charge, the longitudinal wave velocity in the rock mass was calculated). Studies have shown that the use of stemming becomes less effective under certain conditions, namely, with a balance of factors, an increase in the propagation velocity of longitudinal waves in the rock mass, a decrease in the detonation velocity of the explosive charge, a decrease in the length of the upper part of the borehole free of charge, an increase in the length of the upper part of the charge column, starting from the installation site of the bomb, and a specific interval of slowing down along the diagonal of the borehole grid equal to or exceeding 4.9 ms/m. Based on the experiments, it was found that with a specific diagonal slowing down interval of 4.9 ms/m and higher, the efficiency of stemming decreases, especially if the stemming efficiency coefficient (*nez*) exceeds one. To determine the feasibility of using stemming, it is necessary to take into account various mining and geological conditions and parameters of drilling and blasting operations. In the course of the work, the dependence of the excavator productivity on the stemming efficiency indicator was obtained.

For citation: Galimyanov A.A., Kazarina E.N. Clarification of the formula for the relevance of well collection. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 2(168):94-100. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-94-100, EDN: QQDQGC

REFERENCES

1. Mosinets V.N. Crushing and seismic effect of explosion in rocks. M.: Nedra; 1976. 270 p.

2. Moldovan D.V., Chernobai V.I., Sokolov S.T., Bazhenova A.V. Constructive solutions for locking explosion products in an explosive cavity. *Mining*

information and analytical bulletin. 2022; 6–2:5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_5.10:20

3. / Kurchin G.S. [et al.] The effectiveness of the application of downhole drilling. *Collection of scientific tr. Earth Sciences: yesterday, today, tomorrow: IV International Scientific Conference*. 460 Kazan, May 20–23, 2018. Kazan: Limited Liability Company "Young Scientist Publishing House"; 2018. Pp. 17–19.

4. Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Kirsanov A.K. The process of rock destruction during the explosion of an explosive charge. *Bulletin of the Trans-Baikal State University*. 2015; 11(126):10–22.

5. Kutuzov B.N. Methods of conducting blasting operations. Part 1. Destruction of rocks by explosion: textbook. for universities. Moscow: Gornaya Kniga Publishing House; 2007. 471 p.

6. Shevkun E.B., Leshchinsky A.V., Lysak Yu.A., Plotnikov A.Yu. Features of explosive loosening at increased deceleration intervals. *Mining information analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 4:272–282.

7. Shevkun E.B. [et al.] Short combined downhole blasting of high locking capacity. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 4:331–336.

8. Leshchinsky A.V., Shevkun E.B. The influence of the design of blasting wells on reducing the yield of oversized pieces of rock mass. *Problems of subsoil use*. 2020; 1(24):93–102. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.01.093.

9. Leshchinsky A.V., Shevkun E.B. Blasting of blast wells in quarries. Federal Agency for Education, Pacific State University. Khabarovsk: Pacific State University; 2008. 230 p.

10. Demidyuk G. P. [et al.] The impact of the slaughtering on the degree of crushing of rocks by explosion //. Explosive case No. 53/10. Moscow: Nedra; 1963. Pp. 96–105.

11. 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; 5:331–339.

12. Katanov I.B., Skachilov P.G. Substantiation of rational performance of a device for a foam-gel slaughtering. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016; 4(116):64–71.

13. Gorinov S.A. The scheme of the active slaughter. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2010; 5:128–131.

14. Kazarina E.N. [et al.] Substantiation of the effectiveness of the use of a face at the Malomyrsky mine quarry. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2023; 4:413–423.

15. Shevkun E.B. [et al.] Features of production tests of combined blast wells. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 4:97–107.

16. Mityushkin Yu.A., Lysak Yu.A., Plotnikov A.Yu., Ruzhitsky A.V., Shevkun E.B., Leshchinsky A.V. Optimization of blasting parameters by increasing deceleration intervals. *Mining information and Analytical Bulletin*. 2015; 4:341–348.

17. Galimyanov A.A. [et al.] The effectiveness of the application of the face at the Malomyrsky mine quarry. *Mining Journal*. 2024; 6:61–64.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Alexey A. Galimyanov, C. Sc. in Engineering, leading researcher at the rock crushing laboratory of the Institute of Mining, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, a separate division of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, (680000, Russia, Khabarovsk, Turgeneva St., 51), <https://orcid.org/0000-0002-8003-7502>, e-mail: azot-1977@mail.ru

Elizaveta N. Kazarina, junior researcher at the rock crushing laboratory of the Institute of Mining, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, a separate division of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, (680000, Russia, Khabarovsk, Turgeneva St., 51), <https://orcid.org/0009-0006-6701-0934>, e-mail: kazarinaen@mail.ru

Contribution of the authors:

Alexey A. Galimyanov– formulation of the research problem, conceptualization of the study, drawing up the methodology, conducting the study, formal analysis, verification.

Elizaveta N. Kazarina– analysis of thematic literature, conducting research, formal analysis, editing, verification.

All authors have read and approved the final manuscript.

