

ВЛИЯНИЕ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА В КОНСТРУКЦИИ ЗАБОЙКИ НА ЕЕ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ

Д.В. Молдован¹, В.И. Чернобай¹, К.Н. Ястребова¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Moldovan_DV@pers.spmi.ru

Аннотация: Представлены аналитические и экспериментальные результаты исследований по увеличению времени запираания продуктов взрыва во взрывной полости скважины. Лучший выход из вышесказанного – применять комбинированные забойки, такие как запирающая забойка в сочетании с сыпучей. Данная конструкция позволит за счет расклина забойки удерживать продукты взрыва (ПД) во взрываемой полости, сыпучая забойка (отсев, песок) позволит удержать 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. При изготовлении забоек с применением композитных материалов необходимо учитывать площадь поверхности частиц наполнителя в материале забойки, так как слишком большая или, наоборот, слишком маленькая площадь может привести к избыточной хрупкости либо слишком высокой пластичности запирающего устройства. Проведенные расчеты по предлагаемому методу показывают, что сохранение пластических свойств запирающего устройства возможно только при применении наполнителя с определенными размерами частиц. Рассмотренный материал из всех возможных для применения оказался максимально подходящим наполнителем, как с экономической, так и с технологической точки зрения. Представлен расчет оптимального размера частиц наполнителя материала забойки, который можно интерпретировать как полноценную расчетную методику.

Ключевые слова: взрыв, запирающее устройство, пластический материал для забойки, наполнитель, время удержания продуктов взрыва, предел текучести забоечного материала, полиэтилен высокого давления, забойка.

Для цитирования: Молдован Д. В., Чернобай В. И., Ястребова К. Н. Влияние композитного материала в конструкции забойки на ее работоспособность // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 110–121. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_110.

The influence of composite material in the stemming design on its operability

D.V. Moldovan¹, V.I. Chernobay¹, K.N. Yastrebova¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: Moldovan_DV@pers.spmi.ru

Abstract: The paper presents analytical and experimental results of studies to increase the time of locking of the explosion products in the explosive cavity (well). When making stemming with the use of composite materials, one should consider the surface area of the filler particles in the stemming material, as too large or too small area may lead to excessive brittleness, or too high plasticity of the interlocking device. The calculations carried out according to the proposed method show that preserving the plastic properties of the interlocking device is only possible if a filler with certain particle sizes is used. The considered material of all possible applications turned out to be the most suitable filler, both from the economic and technological points of view. In this paper, the presented algorithm for calculating the optimal particle size of the filler material can be interpreted as a complete calculation method.

Key words: explosion, interlocking device, plastic material for stemming, filler, retention time of the explosion products, yield strength of stemming material, high pressure polyethylene, and stemming.

For citation: Moldovan D. V., Chernobay V. I., Yastrebova K. N. The influence of composite material in the stemming design on its operability. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9-1):110-121. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_110.

Введение

При производстве взрывных работ в современной горнодобывающей промышленности все большее распространение приобретают конструкции и устройства из полимерных материалов. В частности, специальные конструкции внутренней формы забоек из таких материалов позволяют отразить ударную волну внутри скважины и задержать продукты взрыва, вследствие чего повышается время взрывного воздействия на разрушаемый массив [1 – 3]. Разработанное устройство многокомпонентной полимерной забойки имеет выпускное отверстие, регулировка диаметра и профиля которого позволяет изменять ударное воздействие на приустьевые слои разрушаемого массива, способствует задержке деформирующейся забойки в устье расширяющейся взрывной полости, увеличивает время высокотемпературного воздействия продуктов детонации на максимально раздробленную породу в ближней области действия взрыва, что, в свою очередь, приводит к снижению выхода отсева и другим полезным эф-

фектам [4 – 6]. Очевидно, разработка нового типа забойки по-прежнему является востребованным запросом со стороны буровзрывного сектора в горнодобывающей промышленности [7, 8].

Обзор литературы

При проведении взрывных работ для лучшей проработки горной массы на карьерах строительных материалов неотъемлемой задачей является удержание ПД во взрывной полости. Запирание ПД можно регулировать забойкой [9 – 11], а именно:

- материалом;
- конструкцией.

Как правило, на карьерах могут использоваться буровая мелочь, остающаяся после проведения взрывных работ, либо песчано-гравийная смесь. Данный забойный материал удерживается в скважине за счет сил трения и веса самого материала [12 – 14].

Также возможно применение глинистых и песчано-глинистых забоек, работа которых определяется сцеплением забойки со стенками скважины и дина-

мическим действием массы материала [15, 16].

Применение в качестве забойки щебня фракцией 20–40 мм положительно сказывается на увеличении времени удержания ПД во взрывной полости, но увеличивает расходы на проведение взрывных работ за счет применения готовой продукции в качестве забойки.

Для определения времени вылета забоечного материала использовался электромагнитный метод [17–19].

Все применяемые забойки, которые работают за счет действия массы, имеют недостаток — масса забойки увеличивается с увеличением массы заряда [20–22].

Отказ от забойки приводит к увеличению скорости сейсмических колебаний [23–25], поэтому самым хорошим вариантом запираания продуктов взрыва может послужить конструкция, изготовленная из пластического материала [26].

Методы исследований

Качество запираания продуктов взрыва во взрывной полости, безусловно, влияет на результат дробления, формирование пылегазового облака и на экономику буровзрывных работ в целом

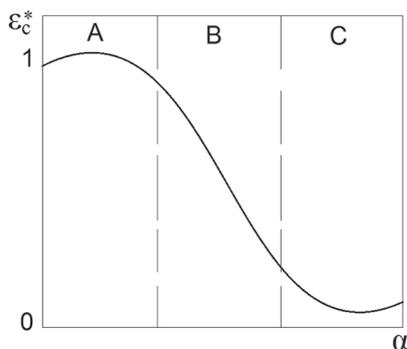


Рис. 1. Зависимость относительного удлинения (в момент разрыва) созданного материала забойки ε_c от степени наполнения α .

Fig. 1. Dependence of the relative elongation (at the moment of rupture) of the created stemming material ε_c on the degree of filling α

[20, 27, 28]. Рассматриваемая в данной работе забойка отличается от своих аналогов специфическими свойствами [29–31].

Так, например, пластичность изделия (забойки) определяет его распор в устье скважины. А пластические свойства композиционного материала (т.е. наполнителя), очевидно, могут общую пластичность забойки изменить в еще более выгодную сторону. Пластические свойства материала наполнителя в лабораторных исследованиях предварительно определяют достаточно простым и надежным методом — растяжением образца в гидравлической разрывной пресс-машине, и результаты этих исследований, очевидно, способствуют достоверной оценке влияния количества наполнителя на итоговую пластичность забойки при ее растяжении уже в скважине во время детонации заряда ВВ.

Итоговые пластические свойства матрицы с равномерно распределенным в ней твердым наполнителем характеризуются зависимостью среднего предельного удлинения ε_c^* от объемной доли наполнителя внутри забойки α . Типичный график данной зависимости представлен на рис. 1 (составлен авторами).

В зависимости от количества наполнителя выделяют три области наполнения:

А — небольшое количество наполнителя и, как результат, большие предельные удлинения, а также слабая зависимость ε_c^* от α ;

В — присутствие большого количества наполнителя, приводящее к хрупкому разрушению материала забойки;

С — переходная область, где в довольно узком диапазоне изменения степени наполнения происходит резкое повышение хрупкости материала, снижение предельного удлинения.

До появления шейки в образце в условиях его статического растяжения внут-

рение напряжения в материале достаточно однородны и равномерны. Но как только начинает образовываться шейка в испытуемом образце, в ней неравномерно возрастают внутренние напряжения, и затем происходит разрушение образца. В редких случаях перед разрушением может возникнуть вторая шейка. Подобным образом при приложении определенных нагрузок может деформироваться высокомолекулярный образец высокой плотности.

Следовательно, средняя предельная деформация ε_c^* , хоть и является величиной эффективной, однако не может характеризовать истинную деформацию в разных точках образца ввиду своего неравномерного и даже зачастую непредсказуемого распределения.

При низком содержании наполнителя в изделии (см. рис. 1, область А) деформация будет такой же, как и при его отсутствии. В результате приложенных нагрузок весь образец перейдет в состояние, характерное для деформированного материала в области шейки.

При увеличении количества наполнителя (см. рис. 1, область В) образец разрушится, особенно если возникает неоднородная пластическая деформация, которая обычно и присутствует при появлении шейки растяжения. Очевидно, в этом случае предельная деформация и деформация при пределе текучести практически равны. Условием возникновения шейки при растяжении является достижение значений внутренних напряжений значений прочности материала σ_p^c , которая должна быть равной величине предела текучести (при растяжении) материала, из которого изготовлены забойки σ_t^k .

Таким образом, баланс соотношения между σ_p^c и σ_t^k может быть описан как модель эффективного сечения, т.е. условие возникновения шейки будет иметь следующий вид:

$$\sigma_p^M \left(1 - \sigma_p^{2/3}\right) \geq \sigma_T^M \left(1 - \sigma_T \sigma_p^{2/3}\right), \quad (1)$$

где σ_p — предел прочности при растяжении материала на момент разрушения; σ_T — предел текучести материала; верхний индекс «М» обозначает отношение показателя к основному материалу забойки, а величины без этого индекса — к материалу наполнителя.

Из выражения (1) можно получить процентное содержание наполнителя α_{kp} , при котором возможен переход от пластического к квазихрупкому разрушению конструкции забойки:

$$\alpha_{kp} = \left(\frac{\sigma_p^M / \sigma_T^M - 1}{\alpha_p \sigma_p^M / \sigma_T^M - \alpha_T} \right)^{2/3}, \quad (2)$$

где α_p — эмпирический коэффициент, зависящий от формы и размера частиц, образующих забойку; α_T — эмпирический коэффициент, зависящий от скорости нагрузки, передаваемой наполнителю забойки.

Соответственно, можно выделить две предельные деформации:

- деформация самой шейки при $\varepsilon_c = \varepsilon_m$;
- деформация при слабой зависимости от наполнителя, которая соответствует пределу текучести ε_T .

Результаты

Как показал производственный опыт, изготовление забойки именно из полимерных материалов оказалось действительно самым простым, быстрым и результативным [32–34]. Более того, наиболее надежное запирание продуктов взрыва во взрывной полости обеспечивается за счет пластичности материала забойки при деформировании. В итоге основной задачей при проектировании запирающих устройств (забоек) являлся выбор такого материала, который при

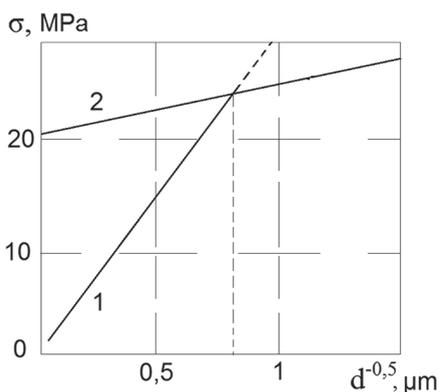


Рис. 2. Зависимость напряжения отслоения (1) и пределов текучести (2) от среднего диаметра частиц наполнителя

Fig. 2. Dependence of peel stress (1) and yield strength (2) on average diameter of filler particles

нагрузках оказывался в состоянии не терять пластичность и не переходить в хрупкое (квазихрупкое) состояние [35]. При этом также и подбор наполнителя осуществлялся с той целью, чтобы, во-первых, он хотя бы не ухудшал общую пластичность, а во-вторых — мог дополнительно выступать еще в роли пламегасителя и флегматизатора для обеспечения экологичности и безопасности ведения взрывных работ [36, 37].

Разрушение композита (т.е. наполнителя) в полиэтилене высокой плотности (ПЭВП, основной материал забойки) происходит по следующему механизму: рост количества пор и их слияние, происходящее на границах раздела сред между частицами наполнителя и матрицей ПЭВП, которое сопровождается перераспределением между ними упругих напряжений ввиду различия их пластических свойств с обеспечением требуемого значения суммарного предела текучести [38].

Установлено, что при уменьшении геометрических размеров частиц наполнителя уменьшается предельное значение разрывного напряжения при растяжении, которое прикладывается к созданному полимерному композиционному

материалу. Данный эффект можно объяснить теорией Гриффитса (концентрация напряжений).

Детальное изучение материалов, предназначенных для изготовления забойки, показало, что в ненаполненном состоянии полимер имеет однородный характер деформации, затем, достигая предела текучести, он становится неоднородным, что приводит к формированию удлинения (шейки), причиной чего является переход материала из упругодеформированного состояния в быстроразвивающийся разрыв.

Получены зависимости напряжения (рис. 2, составлен авторами), а также предела текучести композиционного материала от геометрических размеров наполнителя. При больших диаметрах наполнителя происходит отслоение материала раньше, чем образец достигнет предела текучести.

Анализ результатов

Очевидно, что чем больше диаметр частиц наполнителя, тем меньше нагрузка, при которой возникает пора на границе наполнителя и матрицы материала, и тем стремительнее она развивается, и соответственно, раньше происходит разрыв связей. Следовательно, чтобы увеличить время работы забойки из разработанного состава, необходимо снизить размеры частиц. Подготовить идеально одинаковые частицы наполнителя требуемого диаметра, естественно, невозможно. Поэтому в общей массе частиц наполнителя могут быть (хоть и в малом количестве) частицы размером более 500 мкм. Но, несмотря на это малое количество крупных частиц, все же их наличие представляет большую опасность, так как порообразование на их границах будет интенсивным, что заметно снизит способность забойки в процессе деформирования оставаться целой в течение требуемого времени. А уж в

условиях ударного нагружения материала забойки это обстоятельство тем более будет роковым.

Но и при введении в состав материала забойки частиц с диаметром меньшим, чем минимально возможная дисперсность наполнителя, наблюдается специфическое разрушение полиэтилена, так как это не приводит к нужному значению ударной вязкости созданного материала.

Как видно из рис. 2, при $d < d_{кр}$ возникает локальная пластическая деформация в виде полосы сдвига до того, как начинается отслоение матрицы от отдельных частиц наполнителя. Эта полоса сдвига может возникнуть вблизи макроскопического дефекта на поверхности, или в области повышенной концентрации наполнителя, или крупного агломерата частиц, или простой крупной частицы. В области сдвиговой деформации облегчается отслоение матрицы от частиц из-за большого градиента деформаций вблизи поверхности частицы. Благодаря этому формируется пора, на экваторе которой возникает пластическая деформация, распространяющаяся перпендикулярно приложенной к образцу нагрузке. В результате формируется перфорированная область пор.

С увеличением геометрических размеров отдельностей наполнителя, особенно при $d \geq d_{кр}$, поры, образующиеся на каждой частице, стабилизируются, и постепенно в деформацию вовлекается вся масса полимерной матрицы. Благодаря этому и достигаются большие средние предельные деформации полимерного композитного материала.

Таким образом, в случае наполнения полиэтилена высокой плотности максимальным количеством наполнителя на кривой (см. рис. 1) наблюдается максимум на зависимости предельного удлинения ε_c^* от размера частиц, при условии объемной доли наполнителя. Появление

максимума обусловлено сменой механизмов разрушения, которая проходит от пластического роста пор при условии $d > d_{кр}$ до локализованного срастания пор при условии $d < d_{кр}$. Для развития процесса отслоения необходимо выполнение неравенства $E_y \geq E_n$, где E_y — упругая энергия, образующаяся в элементе объема, который содержит включения, при отслоении; E_n — поверхностная энергия образующего отслоения.

Если поле напряжений, которое создает частица, эффективно в объеме матрицы, равном объему частицы, и при этом размер отслоения сравним с размером включения, то приближенное выражение для критического размера включений может быть получено из условия равенства (3) удельной поверхностной энергии энергии, образующей новые поверхности:

$$\frac{(q\sigma)^2}{E} d_{кр}^3 = \gamma \cdot d_{кр}^2 \quad \text{или} \quad d_{кр} = \frac{\gamma \cdot E}{(q \cdot \sigma)^2}, \quad (3)$$

где σ — одноосное напряжение; q — коэффициент, учитывающий концентрацию напряжений на включении,

$$q \approx \frac{\sqrt{2d_{вкл}}}{d_0};$$

$d_{вкл}$ — диаметр включений; d_0 — постоянная решетки; γ — удельная поверхностная энергия; E — эффективный модуль упругости элемента объема, в котором выделяется энергия.

Данная методика позволяет определить оптимальный размер частиц наполнителя в полимерном композитном материале при различных внешних воздействиях — в нашем случае при применении взрывчатых веществ с различными детонационными характеристиками.

Если, например, $\sigma = 25$ МПа, $q = 2$, $\gamma = 0,5$ Дж/м² для действующих на поверхности раздела физических связей, $E = 84 \cdot 10^2$ МПа, то $d_{кр} = 20$ мкм.

Эксперименты по модификации, например, мела, дали следующие результаты. Мел использовали для наполнения полиэтилена высокой плотности. Отмечено, что при испытаниях на растяжение образцы целиком переходили в шейку даже при содержании наполнителя 50%(об.) (объема), что означает ингибированное инициирование трещин. Подобный эффект наблюдается при наполнении полиэтилена и полипропилена мелом, тальком и каолином. Эффект не сводится к пластификации матрицы, изменению морфологии или снижению кристалличности. Ударная прочность растёт соответственно увеличению содержания олигомера, начиная с концентрации мела 20%(об.).

Заключение

На основании аналитических исследований принципов создания композиционного материала на основе полиэтилена можно сделать вывод, что оптимальным с экономической точки зрения типом наполнителя повышенной плотности для увеличения массы различных типов запирающих устройств может являться кварцевый песок.

Расчеты по предложенной методике показывают, что оптимальный диаметр частиц наполнителя при сохранении пластических свойств изделия, необходимых для качественного распора запирающих устройств в шпурах и скважинах, находится в области 80—120 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Koteleva N., Loseva E. Development of an algorithm for determining defects in cast-in-place piles based on the data analysis of low strain integrity testing // Applied Sciences. 2022, vol. 12, no. 20, article 10636. DOI: 10.3390/app122010636.
3. Jia B., Ling T., Hou S., Liu D. Application of variational mode decomposition based delay time identification in short millisecond blasting // Transaction of Beijing Institute of Technology. 2021, vol. 41, no. 4, pp. 341—348. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.308.
4. Рахманов Р. А., Лоеб Д., Косухин Н. И. Оценка смещений рудных контуров после взрыва с применением ВММ-системы // Записки Горного института. — 2020. — Т. 245. — С. 547—553. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.6.
5. Yi C., Sjöberg J., Johansson D. Numerical modeling for blast-induced fragmentation in sub-level caving mines // Tunneling and Underground Space Technology. 2017, vol. 68, pp. 167—173. DOI: 10.1016/j.tust.2017.05.030.
6. 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. 2015, vol. 5, no. 5, pp. 331—339. DOI: 10.4236/ojg.2015.55030.
7. Маховиков А. Б., Крыльцов С. Б., Матрохина К. В., Трофимец В. Я. Система защищенной корпоративной связи для металлургического предприятия // Цветные металлы. — 2023. — № 4. — С. 5—13. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.01.
8. Иванов В. В., Дзюрич Д. О. Обоснование параметров технологической схемы разработки обводненных месторождений строительного песка // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 33—40. DOI: 10.31897/PMI.2022.3.
9. 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.

10. *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, no. 3-4, pp. 381 – 394. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.08.007.

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. *Silva J., Li L., Gernand J. M.* Reliability analysis for mine blast performance based on delay type and firing time // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, no. 2, pp. 195 – 204. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.07.004.

14. *Karakus M., Ebong U., Liu C., Zhou H.* Three-dimensional finite element analysis for rock fatigue damage under dynamic loading / *ISRM Regional Symposium, EUROCK-2015*. 2015, pp. 577 – 582.

15. *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 Международной научной конференции*. – Казань, 2018. – С. 17 – 19.

16. *Blair D. P.* Limitations of electronic delays for the control of blast vibration and fragmentation. *Rock Fragmentation by Blasting / Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST*. 2010, vol. 9, pp. 171 – 184.

17. *Wu H., Gong M.* Calculation and application of hole by hole blasting vibration superposition based on measured delay times of detonators // *Explosion and Shock Waves*. 2019, vol. 39, no. 2, article 025202. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0415.

18. *Roy M. P., Mishra A. K., Agrawal H., Singh P. K.* Blast vibration dependence on total explosives weight in open-pit blasting // *Arabian Journal of Geosciences*. 2020, vol. 13, no. 13, article 531. DOI: 10.1007/s12517-020-05560-y.

19. *Мысин А. В., Ковалевский В. Н., Должиков В. В.* Экспериментальные исследования параметров функционирования удлиненных зарядов различной конфигурации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 10. – С. 125 – 140. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_125.

20. *Wang Z., Fang C., Chen Y., Cheng W.* A comparative study of delay time identification by vibration energy analysis in millisecond blasting // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013, vol. 60, no. 4, pp. 389 – 400. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.12.032.

21. *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, no. 17, article 3639. DOI: 10.3390/app9173639.

22. *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, no. 4, pp. 389 – 394. DOI: 10.1007/s10749-018-0963-8.

23. *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, no. 17, pp. 278 – 286. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.10.010.

24. *Khandelwal M., Singh T. H.* Evaluation of blast-induced vibration predictors // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2007, vol. 27, no. 2, pp. 116 – 125. DOI: 10.1016/j.soildyn.2006.06.004.

25. *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, no. 3, pp. 545 – 560. DOI: 10.12989/sem.2015.54.3.545.

26. 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.

27. Shi X. Z., Chen S. H. R. Delay time optimization in blasting operations for mitigating the vibration-effects on final pit walls' stability // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011, vol. 31, no. 8, pp. 1154–1158. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.04.004.

28. 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, article 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017.

29. Zhang S., Ling T.-H., Liu H.-R., Cao F. Pattern adapted wavelet time-energy density method and its application in millisecond blast vibration signal analysis // Journal of the China Coal Society. 2014, vol. 39, no. 10, pp. 2007–2013. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0325.

30. Zhang Y., Chen Y., Chen S., Liu H., Fu Z. Experimental study on deformation of a sandy field liquefied by blasting // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2019, vol. 116, pp. 60–68. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.09.042.

31. Хохлов С. В., Соколов С. Т., Виноградов Ю. И., Френкель И. Б. Проведение промышленных взрывов вблизи газопроводов // Записки Горного института. – 2021. – Т. 247. – С. 48–56. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.6.

32. Khokhlov V., Lukin V., Khokhlov S. Modelling full-colour images of Earth: simulation of radiation brightness field of Earth's atmosphere and underlying surface // Annals of GIS. 2023, vol. 29, no. 1, pp. 143–161. DOI: 10.1080/19475683.2022.2064911.

33. Zhang S., Wu S., Zhang G. Three-dimensional strength characteristics of zigong sandstone under true triaxial stresses / 10th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS10). 2018 ISRM International Symposium. 2018. https://www.researchgate.net/publication/331952415_Three-dimensional_Strength_Characteristics_of_Zigong_Sandstone_under_True_Triaxial_Stresses.

34. Камянский В. Н. Повышение эффективности скважинной отбойки на карьерах при одновременном взрывании скважинных зарядов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ГоИ КНЦ РАН, 2019. – 24 с.

35. Cardu M., Giraudi A., Oreste P. A review of the benefits of electronic detonators // Revista Escola de Minas. 2013, vol. 66, no. 3, pp. 375–382. DOI: 10.1590/S0370-44672013000300016.

36. Lange I., Kotiukov P., Lebedeva Y. Analyzing physical-mechanical and hydrophysical properties of sandy soils exposed to long-term hydrocarbon contamination // Sustainability. 2023, vol. 15, no. 4, article 3599. DOI: 10.3390/su15043599.

37. Koteleva N., Frenkel I. Digital processing of seismic data from open-pit mining blasts // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 1, 383. DOI: 10.3390/app11010383.

38. Смирняков В. В., Родионов В. А., Смирнякова В. В., Орлов Ф. А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 71–81. DOI: 10.31897/PMI.2022.12.

39. Коршунов Г. И., Каримов А. М., Магомедов Г. С., Тюлькин С. А. Снижение аэротехногенного воздействия респираторной фракции пыли на персонал карьера при проведении массовых взрывов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 7. – С. 132–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_132. **ГИАЭ**

REFERENCES

1. 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, no. 6-2, pp. 5–17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_5.

2. Koteleva N., Loseva E. Development of an algorithm for determining defects in cast-in-place piles based on the data analysis of low strain integrity testing. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 20, article 10636. DOI: 10.3390/app122010636.
3. Jia B., Ling T., Hou S., Liu D. Application of variational mode decomposition based delay time identification in short millisecond blasting. *Transaction of Beijing Institute of Technology*. 2021, vol. 41, no. 4, pp. 341 – 348. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.308.
4. Rakhmanov R. A., Loeb J., Kosukhin N. I. Estimation of ore contour movement s after the blast using the BMM system. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 245, pp. 547 – 553. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.6.
5. Yi C., Sjöberg J., Johansson D. Numerical modeling forblast-inducedfragmentationin sub-level caving mines. *Tunneling and Underground SpaceTechnology*. 2017, vol. 68, pp. 167 – 173. DOI: 10.1016/j.tust.2017.05.030.
6. 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*. 2015, vol. 5, no. 5, pp. 331 – 339. DOI: 10.4236/ojg.2015.55030.
7. Makhovikov A. B., Kryltsov S. B., Matrokhina K. V., Trofimets V. Ya. Secured communication system for a metallurgical company. *Tsvetnye Metally*. 2023, no. 4, pp. 5 – 13. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.01.
8. Ivanov V. V., Dzyurich D. O. Justification of the technological scheme parameters for the development of flooded deposits of construction sand. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 33 – 40. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.3.
9. 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.
10. 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, no. 3-4, pp. 381 – 394. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.08.007.
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. *Suchasni resursoenergozberigayuchi tekhnologii girnichogo virobnitstva*. 2012, no. 2 (10), pp. 9 – 15.
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 apatitenepheline ores. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 231, pp. 239 – 244. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.2399.
13. Silva J., Li L., Gernand J. M. Reliability analysis for mine blast performance based on delay type and firing time. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, no. 2, pp. 195 – 204. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.07.004.
14. Karakus M., Ebong U., Liu C., Zhou H. Three-dimensional finite element analysis for rock fatigue damage under dynamic loading. *ISRM Regional Symposium, EUROCK-2015*. 2015, pp. 577 – 582.
15. Kurchin G. S., Lobatsevich M. A., Petushkova T. A., Efremov P.Yu. Efficiency of stemming in wells. *Nauki o Zemle: vchera, segodnya, zavtra. Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Earth Sciences: yesterday, today, tomorrow. Materials of the IV International Scientific Conference], Kazan, 2018, pp. 17 – 19. [In Russ].
16. Blair D. P. Limitations of electronic delays for the control of blast vibration and fragmentation. *Rock Fragmentation by Blasting. Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST*. 2010, vol. 9, pp. 171 – 184.
17. Wu H., Gong M. Calculation and application of hole by hole blasting vibration superposition based on measured delay times of detonators. *Explosion and Shock Waves*. 2019, vol. 39, no. 2, article 025202. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0415.

18. Roy M. P., Mishra A. K., Agrawal H., Singh P. K. Blast vibration dependence on total explosives weight in open-pit blasting. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020, vol. 13, no. 13, article 531. DOI: 10.1007/s12517-020-05560-y.
19. Mysin A. V., Kovalevsky V. N., Dolzhikov V. V. Experimental studies on the performance parameters of elongated shaped charges of different configurations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10, pp. 125–140. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_125.
20. Wang Z., Fang C., Chen Y., Cheng W. A comparative study of delay time identification by vibration energy analysis in millisecond blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013, vol. 60, no. 4, pp. 389–400. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.12.032.
21. 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, no. 17, article 3639. DOI: 10.3390/app9173639.
22. 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, no. 4, pp. 389–394. DOI: 10.1007/s10749-018-0963-8.
23. 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, no. 17, pp. 278–286. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.10.010.
24. Khandelwal M., Singh T. H. Evaluation of blast-induced vibration predictors. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2007, vol. 27, no. 2, pp. 116–125. DOI: 10.1016/j.soildyn.2006.06.004.
25. 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, no. 3, pp. 545–560. DOI: 10.12989/sem.2015.54.3.545.
26. 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.
27. Shi X. Z., Chen S. H. R. Delay time optimization in blasting operations for mitigating the vibration-effects on final pit walls' stability. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2011, vol. 31, no. 8, pp. 1154–1158. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.04.004.
28. 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, article 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017.
29. Zhang S., Ling T.-H., Liu H.-R., Cao F. Pattern adapted wavelet time-energy density method and its application in millisecond blast vibration signal analysis. *Journal of the China Coal Society*. 2014, vol. 39, no. 10, pp. 2007–2013. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0325.
30. Zhang Y., Chen Y., Chen S., Liu H., Fu Z. Experimental study on deformation of a sandy field liquefied by blasting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019, vol. 116, pp. 60–68. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.09.042.
31. Khokhlov S. V., Sokolov S. T., Vinogradov Y. I., & Frenkel I. B. Conducting industrial explosions near gas pipelines. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 48–56. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.6.
32. Khokhlov V., Lukin V., Khokhlov S. Modelling full-colour images of Earth: simulation of radiation brightness field of Earth's atmosphere and underlying surface. *Annals of GIS*. 2023, vol. 29, no. 1, pp. 143–161. DOI: 10.1080/19475683.2022.2064911.
33. Zhang S., Wu S., Zhang G. Three-dimensional strength characteristics of zigong sandstone under true triaxial stresses. *10th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS10). 2018 ISRM International Symposium*. 2018. https://www.researchgate.net/publication/331952415_Three-dimensional_Strength_Characteristics_of_Zigong_Sandstone_under_True_Triaxial_Stresses.

34. Kamyanskiy V. N. *Povyshenie effektivnosti skvazhinnoy otboyki na kar'erakh pri raznovremennom vzryvanii skvazhinnykh zaryadov* [increasing the efficiency of borehole breaking in open pits with multi-temporal blasting of borehole charges], Candidate's thesis, Moscow, Gol KNTS RAN, 2019, 24 p.

35. Cardu M., Giraudi A., Oreste P. A review of the benefits of electronic detonators. *Revista Escola de Minas*. 2013, vol. 66, no. 3, pp. 375 – 382. DOI: 10.1590/S0370-44672013000300016.

36. Lange I., Kotiukov P., Lebedeva Y. Analyzing physical-mechanical and hydrophysical properties of sandy soils exposed to long-term hydrocarbon contamination. *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 4, article 3599. DOI: 10.3390/su15043599.

37. Koteleva N., Frenkel I. Digital processing of seismic data from open-pit mining blasts. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 1, 383. DOI: 10.3390/app11010383.

38. Smirnyakov V. V., Rodionov V. A., Smirnyakova V. V., Orlov F. A. The influence of the shape and size of dust fractions on their distribution and accumulation in mine workings when changing the structure of air flow. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 71 – 81. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.12.

39. Korshunov G. I., Karimov A. M., Magamedov G. S., Tyulkin S. A. Reduction of respirable dust-induced impact on open pit mine personnel in large-scale blasting. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 7, pp. 132 – 144. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_132.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Молдован Дмитрий Владимирович¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Moldovan_DV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2227-6625,

Чернобай Владимир Иванович¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: chernobay_vi@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6858-8854,

Ястребова Карина Намидиновна¹ — канд. техн. наук,
научный сотрудник, Научный центр геомеханики
и проблем горного производства,
e-mail: yastrebova_kn@pers.spmi.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Молдован Д.В., e-mail: Moldovan_DV@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.V. Moldovan¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: Moldovan_DV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2227-6625,

V.I. Chernobay¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: chernobay_vi@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6858-8854,

K.N. Yastrebova¹, Cand. Sci. (Eng.),
Researcher, Scientific Center for Geomechanics
and Mining Problems,
e-mail: yastrebova_kn@pers.spmi.ru,

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

Corresponding author: D.V. Moldovan, e-mail: Moldovan_DV@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 02.05.2023; получена после рецензии 08.06.2023; принята к печати 10.08.2023.

Received by the editors 02.05.2023; received after the review 08.06.2023; accepted for printing 10.08.2023.