

Разработка рекомендаций по регулированию кусковатости строительных горных пород при взрывном разрушении

С.Е. Гавришев¹, В.Н. Калмыков¹, В.А. Пикалов², Н.Г. Караулов¹, Н.В. Угольников¹✉

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация

² ООО «Научно-технический центр «Геотехнология», г. Челябинск, Российская Федерация

✉ ugkit@mail.ru

Резюме: Месторождения строительных материалов чаще всего встречаются в Уральском регионе. Поэтому вопрос разработки методики и технологических параметров разработки для получения необходимой кусковатости строительных горных пород является важнейшей задачей современных горных предприятий Южного Урала. В работе проведено исследование распределения гранулометрического состава строительных горных пород до и после взрывного разрушения, после процесса экскавации и перемещения с использованием логарифмически нормального закона. Анализ полученных данных дает возможность установить закономерности изменения основных показателей закона распределения от физико-технологических свойств пород и их структурно-текстурных особенностей. Полученные зависимости позволяют оперативно регулировать параметры буровзрывных работ с целью получения необходимой степени дроблений горных пород различной крепости и трещиноватости. Необходимая степень взрывного разрушения строительных горных пород определяется минимальными суммарными энергетическими затратами по всему циклу подготовки, добычи и переработки (стадия крупного дробления) с учетом максимального выхода товарных фракций крупности. Исследованиями установлено, что для различных типов строительных горных пород выход товарных фракций при постоянной степени дробления будет зависеть от крепости и трещиноватости массивов и может различаться до 20–30%.

Ключевые слова: строительные горные породы, кусковатость, фракционный состав щебня, блочность массива, трещиноватость массива, логарифмически нормальный закон, логарифмическая дисперсия, средний размер куска

Для цитирования: Гавришев С.Е., Калмыков В.Н., Пикалов В.А., Караулов Н.Г., Угольников Н.В. Разработка рекомендаций по регулированию кусковатости строительных горных пород при взрывном разрушении. *Горная промышленность*. 2025;(1):58–63. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-58-63>

Development of recommendations for controlling the lump size of construction rocks during blasting

S.E. Gavrishchev¹, V.N. Kalmykov¹, V.A. Pikalov², N.G. Karaulov¹, N.V. Ugolnikov¹✉

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

² Scientific and Technical Center "Geotechnology" LLC, Chelyabinsk, Russian Federation

✉ ugkit@mail.ru

Abstract: Deposits of construction materials are most often found in the Ural region. Therefore, the issue of developing a methodology and technological parameters of mining to obtain the required lump size of the construction rocks is the most important task of modern mining enterprises in the Southern Urals. The paper studies the distribution of the particle size distribution of the construction rocks before and after blasting, after the excavation and haulage processes using the logarithmic normal law. Analysis of the obtained data helps to establish patterns in the change of the main distribution law indicators from the physical and technological properties of rocks and their structural and textural features. The obtained dependencies make it possible to promptly adjust the drilling and blasting parameters in order to obtain the required fragmentation of rocks of varying strength and fracturing. The required degree of blast fragmentation of the construction rocks is determined by the minimum total energy consumption for the entire cycle of preparation, extraction and processing (the primary crushing stage), taking into account the maximum yield of commercial size fractions. Research has shown that for different types of construction rocks, the yield of the commercial fractions at a constant degree of crushing will depend on the hardness and fracturing of the rock masses and can vary by up to 20–30%.

Keywords: building rocks, lump size, particle size distribution of crushed stone, blocky structure, rock mass fracturing, logarithmic normal law, logarithmic dispersion, average lump size

For citation: Gavrishev S.E., Kalmykov V.N., Pikalov V.A., Karaulov N.G., Ugolnikov N.V. Development of recommendations for controlling the lump size of construction rocks during blasting. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):58–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-58-63>

Введение

По природному происхождению горные породы для изготовления щебня делятся на три группы: магматические породы; осадочные породы обломочного происхождения; осадочные породы органического происхождения.

Гранитный щебень по своему качеству превосходит отвалы щебня, он главным образом применяется при строительстве автомобильных дорог и железнодорожных путей, входит в состав бетона и асфальта, является хорошим декоративным материалом. Из-за хорошей сцепляемости бетонные конструкции получаются прочными и долговечными, поэтому широко применяются для заливки фундаментов, мостовых опор, взлетно-посадочных полос и т.д.

Большое количество известняковых месторождений в Южноуральском регионе предопределило широкое применение породы. Флюсовый известняк применяется в металлургической промышленности, а щебень широко используется в дорожном строительстве, в производстве бетона и как декоративный материал.

Горные породы, используемые в производстве щебня, отличаются прочностными параметрами, плотностными свойствами, а также трещиноватостью и блочностью взрываемого массива.

Щебень различных видов будет отличаться по физическим свойствам из-за разности в минеральном составе и отличий в структурно-текстурных признаках, но в конечном счете его морозостойкость, дробимость, истираемость, лещадность и другие технологические характеристики будут определяться ГОСТами и соответствовать определенным маркам.

В соответствии с ГОСТами 7392–2014, 8267–93, 7392–2014, определяющими основные параметры щебня, установлены следующие фракции щебня:

– ГОСТ 32703–2014: от 4 до 5,6 мм; св. 5,6 до 8 мм; св. 8 до 11,2 мм; св. 11,2 до 16 мм; св. 16 до 22,4 мм; св. 22,4 до 31,5 мм; св. 31,5 до 45 мм; св. 45 до 63 мм. По согласованию изготовителя с потребителем возможен выпуск щебня и гравия в виде более крупной фракции – от 63 до 90 мм;

– ГОСТ 8267–93: от 5(3) до 10 мм; св. 10 до 15 мм; св. 10 до 20 мм; св. 15 до 20 мм; св. 20 до 40 мм; св. 40 до 80(70) мм и смеси фракций от 5(3) до 20 мм. По согласованию изготовителя с потребителем выпускают щебень и гравий в виде других смесей, составленных из отдельных фракций, а также фракций от 80(70) до 120 мм, св. 120 до 150 мм;

– ГОСТ 7392–2014: от 25 до 60 мм.

Основной задачей горных предприятий, разрабатывающих месторождения строительных горных пород, является получение максимально возможного выхода товарной фракции щебня при минимальных эксплуатационных затратах [1]. Для этого необходимо решить следующие за-

дачи: исследовать закономерности распределения гранулометрического состава в зависимости от типа строительных горных пород и их структурно-текстурных признаков; обосновать выбор оптимального метода и параметров производства буровзрывных работ; исследовать процессы экскавации и транспортирования строительных горных пород с целью минимизации энергопотребления и увеличения производительности оборудования. Оптимизацию стадии крупного дробления необходимо осуществлять во взаимосвязке с процессом взрывной подготовки пород и, как следствие, обосновать оптимальную степень взрывного дробления по минимальным суммарным энергозатратам с учетом максимально возможного получения выхода товарной продукции [2–5].

Материалы и методы

При изучении блочности массивов строительных горных пород и кусковатости взорванной горной массы применяются две группы методов: прямые и косвенные. Прямые методы позволяют разделить естественные блоки массива или куски горной массы на фракции определенной крупности, причем самым точным и трудоемким считается ситовый анализ, или грохочение. Косвенные методы позволяют определить выход определенного класса крупности, чаще всего это некондиционные фракции (мелочь или негабарит).

Все традиционные методы определения гранулометрического состава связаны с большим объемом ручного труда и довольно длительным временем обработки данных, что делает невозможным оперативное регулирование геотехнологических параметров производственных процессов.

В последнее время широкое развитие и внедрение получили приборы анализа и определения гранулометрического состава, работа которых основана на технологии нейронных сетей с 3D-визуализацией как способа реализации искусственного интеллекта [6; 7].

Канадская компания Motion Metrics разработала портативное устройство PortaMetrics Gen 2 для 3D-визуализации и определения гранулометрического состава, которое позволяет на расстоянии от 2,5 до 30 м определять частицы размером от 4 см, производить масштабирование уступа или развала и определять их углы откоса. Все полученные данные хранятся в облаке, доступ к которым предоставляется всем авторизованным пользователям.

Несомненным достоинством продукции фирмы Motion Metrics является разработка программно-аппаратных комплексов, позволяющих определять гранулометрический состав на всех последующих геотехнологических процессах. Выпускаются следующие виды комплексов, позволяющих произвести анализ гранулометрического состава:

ShovelMetrics – для ковшей погрузчиков и экскаваторов; TruckMetrics – для автосамосвалов; BeltMetrics – для ленточных конвейеров.

Несмотря на высокое качество продукции зарубежных компаний, сложившаяся международная политическая обстановка не позволяет в полной мере использовать возможности зарубежной продукции. В связи с этим отечественная компания ООО «Давтех» разработала собственный аналог программно-аппаратного комплекса Гравикс.

После обработки искусственным интеллектом полученных данных кусковатости составляется отчет в виде суммарных графиков, гистограмм или в табличном виде, которые позволяют прогнозировать гранулометрический состав взорванной горной массы и оперативно регулировать параметры буровзрывных работ с целью обеспечения максимально возможного получения товарной фракции.

Вопросам качества взрывной подготовки, определяющей производительность горнотранспортного оборудования [2; 8; 9], и прогнозирования гранулометрического состава взорванных горных пород посвящено множество научных работ ведущих отечественных и зарубежных исследователей [10–12]. Анализ разработанных законов распределения показал, что для прогнозирования гранулометрического состава при любой крупности достоверные результаты были получены при использовании логарифмически нормального вероятностного закона распределения, который был разработан и математически обоснован одним из основоположников современной теории вероятностей, профессором, доктором физико-математических наук, академиком А.Н. Колмогоровым [13].

В дальнейшем применимость логнормального закона обоснована в работах и других исследователей, которые доказали, что при изменении параметров буровзрывных работ в широком диапазоне в одинаковых по физико-механическим свойствам горных породах логарифмическая дисперсия остается постоянной, изменяется лишь количественная величина фракций [13].

Исследования трещиноватости (блочности) массивов и гранулометрического состава взорванных горных пород проводились на карьерах Южноуральского региона. Для оценки распределения фракций в массиве (блочность) и во взорванной горной массе (гранулометрический со-

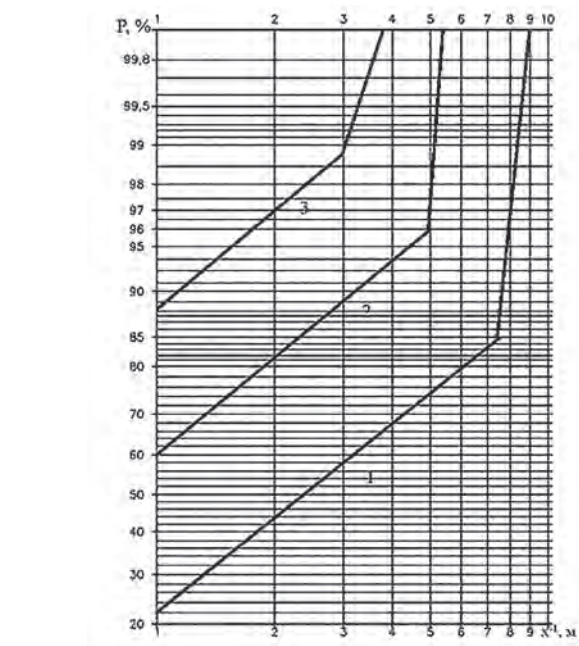


Рис. 1
Распределение гранулометрического состава:
1 – в развале;
2 – в кузове автосамосвала;
3 – после транспортировки

Fig. 1
Particle size distribution:
1 - in the muck pile;
2 - in the dump truckbox;
3 - after transportation

став) использовался логарифмически нормальный закон. Логарифмическая дисперсия, характеризующая распределение гранулометрического состава, определялась в развале после взрыва, в автосамосвале после погрузки и в горной массе после транспортирования и разгрузки. Для условий Круторожинского месторождения в среднетрещиноватых породах с коэффициентом крепости 12 логарифмическая дисперсия составила 1,2 (рис. 1). Результаты исследования распределения гранулометрического состава на известняковых месторождениях и месторождениях строительных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1
Значения основных исследуемых показателей пород месторождений

Table 1
Values of the main investigated indicators of the rocks in deposits

Месторождение (предприятие)	Коэффициент крепости	Категория трещиноватости	Средний размер естественной отдельности, м	Логарифмическая дисперсия
Известняковые, доломитовые месторождения				
Худолазское	6–10	II–IV	0,55–1,31	0,52–1,63
Агаповское	5–11	I–IV	0,58–1,20	0,58–1,70
Аккермановское	7–12	I–IV	0,68–1,23	0,58–1,54
Тургоякское	6–12	II–IV	0,60–1,18	0,61–1,67
Месторождения строительных материалов				
Круторожинское	6–14	II–IV	0,85–1,42	0,78–1,72
Гумбейское	6–12	II–IV	0,79–1,40	0,68–1,68
Магнитогорский	6–14	II–V	0,82–1,52	0,75–1,82

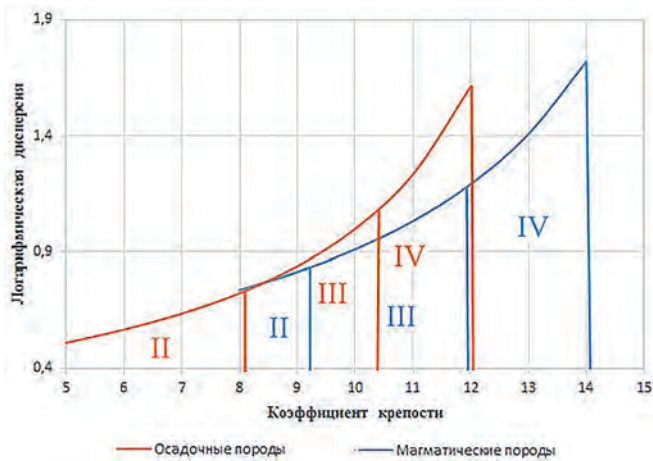


Рис. 2
Зависимость величины логарифмической дисперсии от коэффициента крепости пород

Fig. 2
Dependence of the logarithmic dispersion value on the rock hardness ratio

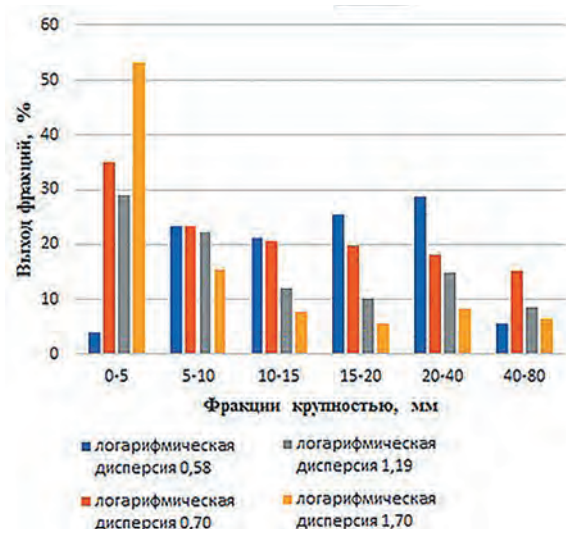


Рис. 4
Распределение фракций при среднем размере куска 0,2 м

Fig. 4
Particle size distribution at an average lump size of 0.2 m

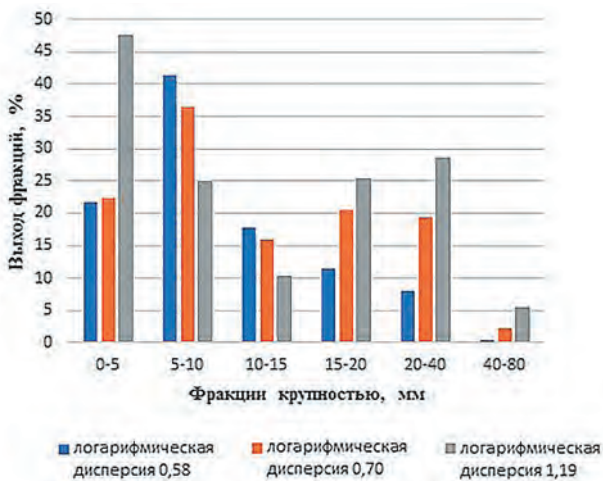


Рис. 3
Распределение фракций при среднем размере куска 0,1 м

Fig. 3
Particle size distribution at an average lump size of 0.1 m

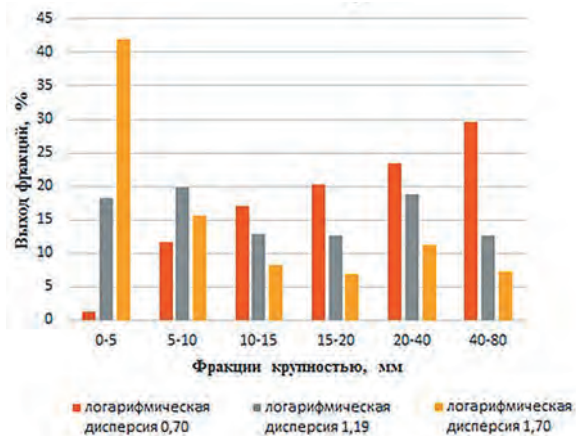


Рис. 5
Распределение фракций при среднем размере куска 0,3 м

Fig. 5
Particle size distribution at an average lump size of 0.3 m

Результаты

Согласно проведенным исследованиям определена область значений логарифмической дисперсии для различных месторождений строительных материалов в зависимости от крепости и трещиноватости (блочности) горных пород. Для известняковых месторождений для мелкоблочных пород (рис. 2, II) логарифмическая дисперсия изменяется в пределах 0,58–0,7; среднеблочных (рис. 2, III) – 0,7–1,19; крупноблочных (рис. 2, IV) – 1,19–1,7.

Для месторождений строительных материалов для мелкоблочных пород (см. рис. 2, II) логарифмическая дисперсия изменяется в пределах 0,68–0,86; среднеблочных (см. рис. 2, III) – 0,86–1,25; крупноблочных (см. рис. 2, IV) – 1,25–1,82.

Полученные зависимости описываются следующими уравнениями:

$$\beta = 0,0596f^{1,253} \quad (1)$$

– для известняковых месторождений
при величине достоверности $R^2 = 0,9233$;

$$\beta = 0,0318f^{1,48} \quad (2)$$

– для месторождений строительных материалов
при величине достоверности $R^2 = 0,96$.

Применение логарифмически нормального закона распределения гранулометрического состава позволяет определить по известной логарифмической дисперсии фактический выход определенной фракции крупности при различном среднем размере куска [14]. На примере Аккермановского, Агаповского, Худолазского месторождений известняков, в зависимости от блочности и прочности пород определены выходы фракций крупности менее 5 мм; 5(3) до 10 мм; св. 10 до 15 мм; св. 10 до 20 мм; св. 15 до 20 мм; св. 20 до 40 мм; св. 40 до 80(70) мм при изменении среднего размера куска взорванной горной массы от 0,1 до 0,3 м (рис. 3, 4, 5).

Заключение

В результате изучения распределения гранулометрического состава строительных горных пород установлена закономерность изменения значения логарифмической

дисперсии в зависимости от крепости и блочности горных пород. Определены пределы ее изменения для строительных горных пород рассматриваемых месторождений. Также установлена зависимость выхода требуемых ГОСТами фракций крупности от среднего размера куска взорванной горной массы пород различной блочности.

Прогнозирование гранулометрического состава строительных горных пород позволяет оперативно определять необходимую степень дробления пород различной крепо-

сти и блочности с целью получения максимально возможного выхода товарной фракции при минимальном выходе некондиционных фракций, в частности, мелочи.

Исследование закономерностей изменения гранулометрического состава строительных горных пород направлено на снижение энергоемкости процессов добычи и переработки строительных материалов и повышение производительности горнотранспортного оборудования.

Список литературы / References

1. Егоров В.В., Волокитин А.Н., Угольников Н.В., Соколовский А.В. Обоснование параметров и технологии производства буровзрывных работ, обеспечивающих требуемую кусковатость. *Горная промышленность*. 2021;(3):110–115. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-3-110-115>
Egorov V.V., Volokitin A.N., Ugolnikov N.V., Sokolovsky A.V. Justification of parameters and technology of drilling and blasting operations to ensure the required lumpiness. *Russian Mining Industry*. 2021;(3):110–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-3-110-115>
2. Маринин М.А., Рахманов Р.А., Аленичев И.А., Афанасьев П.И., Сушкова В.И. Изучение влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаватора WK-35. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(6):111–125. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111
Marinin M.A., Rakhmanov R.A., Alenichev I.A., Afanasyev P.I., Sushkova V.I. Effect of grain size distribution of blasted rock on WK-35 shovel performance. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(6):111–125. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111
3. Moldovan D.V., Chernobai V.I., Kovalevskiy V.N. Solving the issue of regulating the granulometric composition of shattered rock mass depending on the quality of locking explosion products in the explosion cavity. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017;8(11):1133–1142. Available at: https://iaeme.com/Home/article_id/IJMET_08_11_116 (accessed: 11.11.2024).
4. Брухавецкая А. О. Сравнительный анализ степени фрагментации горной массы, взорванной с применением неэлектрических систем инициирования и детонирующего шнура. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(3):31–41. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_31
Brukhavetskaya A.O. Comparative analysis of rock fragmentation by blasting using nonelectric initiation systems and detonating cords. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(3):31–41. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_31
5. Ракишев Б.Р., Орынбай А.А., Ауэзова А.М., Куттыбаев А.Е. Гранулометрический состав взорванных пород при различных условиях взрывания. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(8):83–94. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94>
Rakishev B.R., Orynbay A.A., Auezova A.M., Kuttybaev A.E. Grain size composition of broken rocks under different conditions of blasting. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(8):83–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94>
6. Великанов В.С., Дремин А.В., Чернухин С.А., Ломовцева Н.В. Технологии нейронных сетей в интеллектуальном анализе данных гранулометрического состава взорванных пород. *Горная промышленность*. 2024;(4):90–94. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-90-94>
Velikanov V.S., Dremin A.V., Chernukhin S.A., Lomovtseva N.V. Neural network technologies in mining data on particle size distribution of muck pile rocks. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):90–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-90-94>
7. Дремин А.В., Великанов В.С. Цифровые технологии для взрывных работ: интеллектуальный автономный программно-аппаратный комплекс компании «Давтех» для анализа гранулометрического состава горных пород. *Горная промышленность*. 2023;(6):57–62. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-57-62>
Dremin A.V., Velikanov V.S. Digital technologies in blasting: DAVTECH's intelligent autonomous hardware-and-software suite for analyzing particle size distribution of rocks. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):57–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-57-62>
8. Rajak M.K., Pradhan G.K., Prince M.J. A. Assessment of blasting quality of an opencast mine. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019;8(12):4396–4397. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L3912.1081219>

9. Угольников Н.В., Доможиров Д.В., Тептеев Г.Н., Игнатов Н.А. Совершенствование технологии производства буровзрывных работ на Круторожинском карьере «ОКУ». В кн.: Тулупов О.Н. (ред.) *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докл. 78-й междунар. науч.-техн. конф., г. Магнитогорск, 20–24 апр. 2020 г.* Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова; 2020. Т. 1. С. 14.
10. Ouchterlony F., Sanchidrián J.A., Moser P. Percentile fragment size predictions for blasted rock and the fragmentation – energy fan. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017;50(4):751–779. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1094-x>
11. Zhang Z.-X., Sanchidrián J.A., Ouchterlony F., Luukkanen S. Reduction of fragment size from mining to mineral processing: A Review. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023;56(1):747–778. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-03068-3>
12. Гаврилкович Э.Г., Оника С.Г., Гец А.К., Жуков С.А. Гранулометрический состав кусков взорванной горной массы и его вероятностное распределение в условиях карьера природного камня. *Горный журнал*. 2022;(4):52–56. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.04.08>
Gavrilkovich E.G., Onika S.G., Gets A.K., Zhukov S.A. Fragment size distribution and its probability distribution in blasted rock mass in a natural stone quarry. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(4):52–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.04.08>
13. Угольников В.К., Гавришев С.Е., Угольников Н.В. Влияние трещиноватости массива горных пород на кусковатость взорванной горной массы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006;(3):213–216.
Ugolnikov V.K., Gavrishhev S.E., Ugolnikov N.V. Effect of the rock mass fracturing on the lump size of rocks on the muck-pile. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2006;(3):213–216. (In Russ.)
14. Угольников Н.В., Караулов Н.Г., Симаков Д.Б., Чуприн А.П., Митрошин Н.Н. Определение выхода товарной фракции флюсовых известняков Аккермановского месторождения. В кн.: Пыхтунова С.В. (ред.) *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докл. 81-й междунар. науч.-техн. конф., г. Магнитогорск, 17–21 апр. 2023 г.* Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова; 2023. Т. 1. С. 17.

Информация об авторах

Гавришев Сергей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8594-8463>

Калмыков Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация

Пикалов Вячеслав Анатольевич – доктор технических наук, начальник отдела ООО «Научно-технический центр «Геотехнология», г. Челябинск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0003-9251-5190>

Караулов Николай Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-4685-5402>

Угольников Никита Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2274-2753>; e-mail: ugkit@mail.ru

Information about the authors

Sergey E. Gavrishhev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of the Development of Mineral Deposits, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8594-8463>

Vyacheslav N. Kalmykov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Development of Mineral Deposits, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Viacheslav A. Pikalov – Dr. Sci. (Eng.), Head of Department of Scientific and Technical Center “Geotechnology” LLC, Chelyabinsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0003-9251-5190>

Nikolay G. Karaulov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Development of Mineral Deposits, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-4685-5402>

Nikita V. Ugolnikov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Development of Mineral Deposits, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2274-2753>; e-mail: ugkit@mail.ru

Article info

Received: 27.10.2024

Revised: 09.01.2025

Accepted: 14.01.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.10.2024

Поступила после рецензирования: 09.01.2025

Принята к публикации: 14.01.2025