

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ КУЗНЕЦОВА-РАММЛЕРА ПРИ ОПИСАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНСОСТАВА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ

М.А. Маринин¹, П.И. Афанасьев¹, В.И. Сушкова¹, К.Д. Устименко¹, А.Р. Ахметов¹

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

Аннотация: Проведен анализ применяемых в практике горного дела вероятностных распределений, которые описывают гранулометрический состав взорванной горной массы. Для условий опытных блоков рудного карьера при помощи программного продукта «WipFrag» получены экспериментальные распределения фракций взорванной горной массы. Экспериментальные данные сравнивались с прогнозными распределениями по модели Кузнецова-Раммлера. Установлено, что параметры инициирования скважинных зарядов влияют на фактическое распределение грансостава взорванной горной массы. В зависимости от схемы инициирования и номиналов замедлений врубовых и эшелонных поверхностных сетей изменяются значения линии наименьшего сопротивления и расстояния между скважинными зарядами при массовом взрыве. Анализ показал, что учет изохрон инициирования массового взрыва позволяет достичь лучшего согласования с экспериментальными кривыми распределения грансостава по показателю однородности распределения кусков. Предложен способ калибровки модели Кузнецова-Раммлера для описания результатов взрывного разрушения горной породы. В предлагаемом подходе учитываются фактические значения линии наименьшего сопротивления и расстояния между скважинными зарядами, формируемые с учетом изохрон инициирования (изолинии одновременности).

Ключевые слова: взорванная горная масса, гранулометрический состав, модель Кузнецова-Раммлера, параметры буровзрывных работ, показатель однородности, схема инициирования, сетка скважин, номинал замедления.

Для цитирования: Маринин М. А., Афанасьев П. И., Сушкова В. И., Устименко К. Д., Ахметов А. Р. Опыт применения модели Кузнецова-Раммлера при описании распределения грансостава взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 96–109. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_96.

The experience of using the Kuz-Ram model in describing of grain size distribution of blasted rock mass

M.A. Marinin¹, P.I. Afanasyev¹, V.I. Sushkova¹, K.D. Ustimenko¹, A.R. Akhmetov¹

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

Abstract: The article gives an analysis of probabilistic distributions used in mining practice, which describe the granulometric composition of the exploded rock mass. Experimental distributions of fractions of the exploded rock mass were obtained for the conditions of experimental blocks of an ore quarry using the WipFrag software product. The experimental data were compared with the predicted distributions according to the Kuz–Ram model. It is established that the parameters of the initiation of borehole charges affect the actual distribution of the granulated rock mass. Depending on the initiation scheme and deceleration ratings of the cut-in and echelon surface networks, the values of the line of least resistance and the distance between borehole charges during a mass explosion change. The analysis showed that taking into account the isochronous initiation of a mass explosion makes it possible to achieve a better agreement with the experimental grain composition distribution curves in terms of the uniformity of the distribution of pieces. A method for calibrating the Kuz–Ram model to describe the results of explosive rock destruction is proposed. The proposed approach takes into account the actual values of the line of least resistance and the distance between the borehole charges, formed taking into account the isochronous initiation (isoline simultaneity).

Key words: blasted rock mass, grain size distribution, Kuz-Ram model, parameters of drilling and blasting operations, uniformity index, initiation pattern, blast pattern, delay interval.

For citation: Marinin M. A., Afanasyev P. I., Sushkova V. I., Ustimenko K. D., Akhmetov A. R. The experience of using the Kuz-Ram model in describing of grain size distribution of blasted rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9-1):96-109. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_96.

Введение

Буровзрывной комплекс находится в начале цикла горного передела, поэтому от качества производства взрывных работ значительно зависят последующие технологические операции: экскавация горной массы, транспортировка, дробление [1 – 4]. Продуктом производства буровзрывных работ (БВР) является взорванная горная масса (ВГМ). Грансостав ВГМ существенно влияет на ряд параметров и показателей карьера, условия работы горнодобывающего и горнотранспортного оборудования, и является универсальным критерием оценки качества взрывного дробления [5 – 8].

В практике горного дела предложены закономерности формирования фракций горной массы в развале в зависимости от физико-механических характеристик массива, технологических параметров

разработки, типа взрывчатых веществ и принятых параметров буровзрывных работ (БВР) [9 – 11]. Для описания кумулятивной кривой грансостава ВГМ могут быть применены следующие модели: логнормальное распределение [12 – 15], распределение Розина-Раммлера [16], распределение Вейбулла [17], гамма-распределение [18], распределение Swebres [19 – 21]. Данные модели для описания распределения грансостава ВГМ используют два определяемых параметра, а распределение Swebres использует три параметра: максимальный размер куска (X_{max}), класс крупности для 50% прохождения (X_{50}) и степень однородности кривой распределения (b). Следует отметить, что существуют другие модификации данных распределений с большим числом параметров, а также их комбинациями [22 – 23].

При выборе одного из распределений, описывающего выход гранулометрического состава ВГМ, нужно исходить из математического и физического обоснования модели. Применяемые на практике функции распределения подразумевают, что куски горной породы являются непрерывными величинами. В результате рассчитанный размер куска горной породы является вероятностным событием, поскольку непрерывная величина с точки зрения математического аппарата задается с помощью функции распределения.

Выбор размера куска, позволяющего описать разрушенную горную массу, зависит от задачи и характера функции распределения. Так можно выделить математическое ожидание непрерывной величины, медиану распределения и моду распределения. Математическое ожидание непрерывной величины по сути является средневзвешенной величиной, то есть определяет характерный размер куска с учетом весового распределения. Медиана распределения делит всю горную массу частиц пополам, а мода показывает локальные максимумы характерных для данного распределения величин. Строго говоря, выбор той или иной величины, с помощью которой в дальнейшем следует охарактеризовать распределение, зависит от самого распределения и цели применения в дальнейшем полученной величины, так, например, в случае нахождения нескольких максимумов грансостава следует оценивать не с помощью одного параметра средневзвешенной величины или медианы распределения, а с помощью двух-трех мод.

В практике описания гранулометрического состава встречаются размеры кусков породы X20, X50, X80, что соответствует прохождению до 20%, 50%, 80% соответственно. Использование данных размеров связано с требованием опти-

мизации взрывных работ для условий обогатительной фабрики [24].

А.Н. Колмогоров обосновал логарифмически-нормальное распределение совокупности частиц при дроблении горной породы в дробилках, показав, что конечное распределение частиц по размерам асимптотически стремится к логнормальному закону, не зависимо от начального распределения [25]. Исследования [12] показали, что этот закон также подтверждается при дроблении горных пород взрывом. При построении решения предполагается, что начально есть совокупность частиц с произвольным распределением по размерам, вероятность дробления и конечное распределение кусков не зависят от размера и других параметров частиц, а количество дроблений велико [26].

Кроме этого, логарифмически нормальное распределение не имеет отрицательных значений и является асимметричным распределением. А также логнормальное распределение имеет интервал случайной величины от нуля до бесконечности, поэтому часто применяют так называемое усеченное распределение для обоснования грансостава до максимального размера естественной отдельности в массиве и/или негабарита. Как правило, логарифмическое распределение хорошо описывает куски горной породы от 10 до 300 мм.

В настоящее время благодаря трудам Очерлони [19, 21] в горном деле распространено распределение Swebrec. Данное распределение имеет три параметра с помощью которых можно аппроксимировать экспериментальную кумулятивную кривую. Преимуществами модели является то, что она позволяет использовать одно распределение как для мелких, так для крупных кусков породы. При этом модель со временем усложнилась и появилась расширенная модель Swebrec с пятью параметрами. Увеличе-

ние числа параметров приводит к увеличению числа их комбинаций, с помощью которых можно описать кумулятивную кривую [27]. При трех параметрах — это три факториал комбинаций, а в случае пяти параметров — пять факториал, то есть таких комбинаций становится в 20 раз больше, поэтому легче «подогнать» распределение Swebrec к фактическому распределению кусков ВГМ. К настоящему моменту автором не предложено физическое обоснование, а также необходим математический анализ распределение Swebrec. В противовес распределению Swebreca, анализируя практику применения распределения Розина-Раммлера, Очерлонни указывает на расхождение экспериментальной кумулятивной кривой до размера кусков горной породы 200 мм.

В.М. Кузнецов [28] предложил теоретическое обоснование функции распределения Розина-Раммлера. В этой модели предполагается, что все куски породы имеют плоские грани, которые

параллельны. Таким образом, задача сводится к рассмотрению процесса возникновения двух плоских трещин, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Кроме того, модель предполагает, что материал разгружается после взрывного воздействия, что особенно верно для разрушения отрывом в зоне трещинообразования, когда возле трещин происходит разгрузка. Параметр L_0 , который указывает на то, что вероятность возникновения двух трещин на расстоянии, превышающем его, более вероятно, чем на близких расстояниях. Это связано с размером зоны разгруженной трещины [23, 25]. Также модель предполагает, что вероятность появления двух трещин на бесконечно малом отрезке равна нулю, а вероятность появления одной трещины пропорциональна длине этого отрезка. В качестве особенности следует отметить, что рассчитываемый размер куска фактически является длиной трещины, полученной на основе применения теории Гриффитса.

Таблица 1

Проектные параметры БВР
Design parameters of BVR

Наименование № блока	Ед. изм	Показатель				
		1	2	3	4	5
Диаметр скважинного заряда	мм	315	315	315	315	315
Длина скважинного заряда	м	11,5	11,5	12,5	11,5	13
Длина перебура	м	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Высота уступа (средняя)	м	15	15	15	14,5	15,5
Rock Factor, A		13	13	13	10	9
Принятое отклонение для сетки скважин при бурении	м	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Схема бурения		шахматная				
Расстояние между рядами	м	7,5	7,8	7,5	7,5	7,5
Расстояние между скважинами в ряду	м	8,6	9	8,6	8,6	8,6
Коэффициент сближения		1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Номинал замедления врубового ряда	мс	67	67	42	42	25
Номинал замедления эшелона	мс	42	42	109	165	109

Методы

В условиях 5 взрывных блоков рудного карьера по мере подвигания экскаваторного забоя проведена серия фото замеров развала ВГМ. Полученные изображения обработаны фотопланиметрическим способом в специализированном программном обеспечении (ПО). В качестве ПО принят канадский продукт «WipFrag» [29]. В работе [30] описана методология сбора и обработки данных.

Сбор и анализ данных проводился на взрывных блоках со сжимами горно-геологическими условиями. Массив взрывных блоков № 1, № 2 и № 3 представлен преимущественно среднетрещиноватыми породами с коэффициентом крепости по М.М. Протодяконову 13–14. Массив взрывных блоков № 4 и № 5 представлен преимущественно среднетрещиноватыми породами с коэффициентом крепости по М.М. Протодяконову 11–12.

Проектные параметры массовых взрывов приведены в табл. 1.

По результатам обработки изображений построена кумулятивная кривая распределения грансостава ВГМ и получены параметры x_c — характерный размер (средневзвешенный размер [26, 28]), который является эквивалентом выхода куска $X_{63,2}$ и показатель степени n (индекс однородности), который характеризует равномерность распределения ВГМ. Полученную кумулятивную кривую принимаем за фактическое распределение грансостава ВГМ для условий массива горных пород и принятых параметрах БВР.

Далее требуется провести сравнение фактического распределения с прогнозным распределением грансостава ВГМ по модели Кузнецова-Раммлера [31–34]. Согласно модели предварительно можно вычислить x_c (1) и n (2), а затем построить кумулятивную кривую распределения (3).

Так, средневзвешенный размер куска (x_c) определяется по формуле:

$$x_c = A Q_e^{\frac{1}{6}} q^{-0,8} \left(\frac{RBS}{115} \right)^{-\frac{19}{30}}, \quad (1)$$

где A — «rock factor»; q — удельный расход ВВ, кг/м³; Q_e — масса ВВ в тротиловом эквиваленте; RBS — переводной коэффициент на эквивалент по Игданиту.

Стоит обратить внимание, что значение «rock factor» исследователи рассчитывают по-разному: одни могут использовать не физико-механические характеристики массива, а твердость по шкале Мооса, другие изменяют коэффициенты в расчетных формулах, также следует отметить низкую вариативность значений «rock factor» при описании характеристик горной породы.

Параметр (n) индекс однородности определяется по формуле:

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{d} \right) \cdot \left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right)^{0,5} \cdot \left(1 - \frac{W}{B} \right) \cdot \left(\frac{\text{abs}(CCL - BCL)}{L_t} + 0,1 \right)^{0,1} \cdot \left(\frac{L_t}{H} \right), \quad (2)$$

где B — линия наименьшего сопротивления (ЛНС), м; d — диаметр скважины, мм; S — расстояние между скважинами (РМС), м; W — отклонение при бурении, м/м; CCL — длина колонки заряда без учета длины заряда в перебуре, м; BCL — длина заряда в перебуре, м; L_t — общая длина заряда ($CCL + BCL$), м; H — высота уступа, м.

Для описания распределения кусков ВГМ используется кумулятивная кривая Розина-Раммлера [35]:

$$y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_c} \right)^n \right], \quad (3)$$

где y — кумулятивный выход; x — размер частиц.

Таблица 2

Параметры БВР с учетом изохрон инициирования
BVR parameters taking into account isochrones of initiation

Наименование	№ блока	Ед. изм	Показатель				
			1	2	3	4	5
Расстояние между эшелонами инициирования (ЛНС)		м	5,2	5,3	3	4,5	4,5
Расстояние между скважинами в эшелоне инициирования (РМС)		м	12,2	11	18	12	13,5
Динамический коэффициент сближения			2,3	2,1	6	2,7	3

Прогнозное распределение грансо-става ВГМ предлагается рассмотреть как по параметрам проектной сетки бурения, так и с учетом фактической ЛНС, создаваемой изохронами инициирования (линии одновременного взрывания скважин) скважинных зарядов и далее сравнить полученные прогнозные значения с экспериментальными значениями по данным обработки в ПО «WipFrag».

Для условий исследуемых блоков параметры «динамической сетки» приведены в табл. 2.

Для определения «динамической» сетки рассмотрим пример (рис. 1). Проектная сетка на бурения 8,6 м в ряду и 7,5 м между рядами, диагональная схема инициирования с номиналами замедлений в врубовом ряду 65 мс и эшелонах 42 мс (рис. 1, а). С учетом изохрон

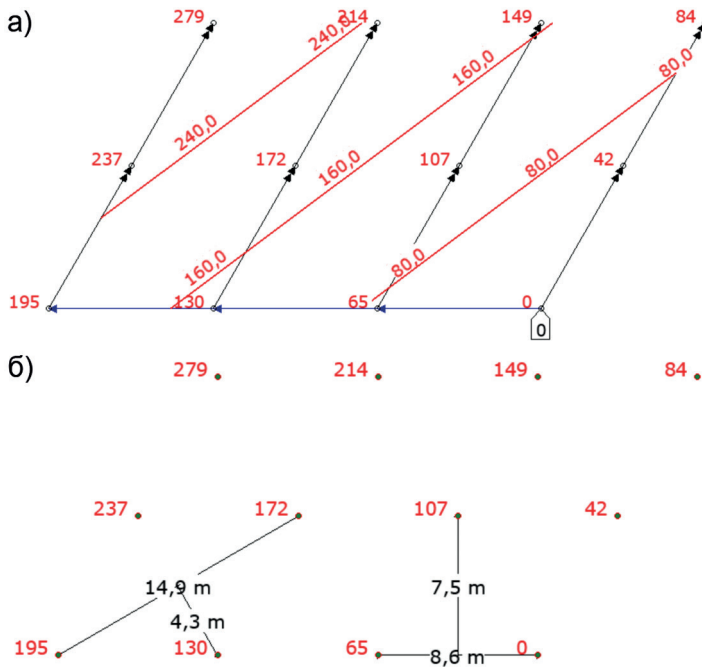


Рис. 1. Определение фактических ЛНС и расстояния между скважинами: схема монтажа с изохронами инициирования (а); расстояния по проектной сетке бурения и с учетом изохрон инициирования (б)

Fig. 1. Definition of actual LNS and spacing between the holes: initiation pattern with isochrones of initiation (a); distances according to the design drilling grid and taking into account initiation isochrones (b)

инициирования ЛНС составит 4,3 м, а расстояние между скважинами (РМС) 14,9 м (рис. 1, б).

Важно отметить, что для определения «динамической» сетки требуется сначала измерить по изохроне инициирования фактическое РМС в эшелоне инициирования, затем принять расстояние между рядами, так чтобы расчетный удельный расход ВВ остался неизменным.

Таким образом, можно произвести калибровку модели Кузнецова-Раммлера для оценки распределения кусков ВГМ на основе параметров «динамической» сетки скважин, полученной согласно изохронам инициирования.

Результаты и обсуждение

Следует отметить некоторые особенности по методу сбора данных по развалу ВГМ и фотопланиметрическому анализу:

1. Отклонение распределения кусков ВГМ от реальных размеров, в основном, зависит от двух факторов — это соблюдение параллельного расположения матрицы фотоаппарата к поверх-

ности откоса и контраст изображения. Данные факторы являются контролируруемыми и корректируемыми, поэтому возможное отклонение может составлять до 15%.

2. Программное обеспечение «WipFrag» (и другие) требует дополнительного ручного распознавания кусков горной породы в затруднительных ситуациях (наличие пыли на кусках породы, наличие тени от ковша экскаватора и т.д.).

3. Обращает на себя внимание, что имеет место незначительный выход мелких фракций до 0–200 мм по фактическому распределению согласно ПО «WipFrag» (рис. 2, синяя линия). Это связано в первую очередь со сложностью увидеть на фотографиях куски данных размеров и отдельно их отрисовать.

4. Кроме этого ПО «WipFrag» отдельно выдает параметры распределения Розина-Раммлера. Если подставить полученные значения x_c и n в вероятностную кривую Розина-Раммлера, то получим распределение с учетом мелких фракций (рис. 2, красная линия).

Для условий исследуемых блоков наблюдаются технические сложности

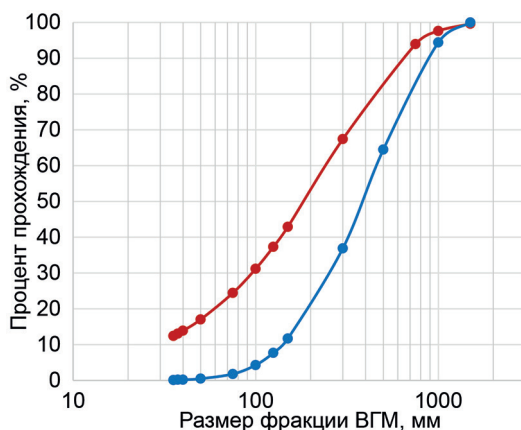


Рис. 2. Сравнение кривых распределения «WipFrag» по данным блока № 1 (где синее распределение — экспериментальная кривая по «WipFrag», красное распределение — расчетная кривая по значениям n и x_c)

Fig. 2. Comparison of «WipFrag» distribution curves from the data of block #1 (where blue distribution is the experimental curve by «WipFrag», red distribution is the calculated curve by the values of n and x_c)



Рис. 3. Схема монтажа взрывной сети с изохронами инициирования блока № 1
 Fig. 3. Initiation patterns with isochrons of initiation of block No. 1

в определении фактических значений ЛНС и РМС, поэтому указанные параметры принимаются усредненными, что связано с рядом следующих факторов:

- выбор частоты нанесения изохрон на схему монтажа,
- исходное бурение не имеет жесткой привязки скважин относительно верхней бровки уступа,
- различное пространственное расположение скважин относительно расположения врубового ряда,
- направление инициирования по блоку.

Например, на рис. 3, 4 представлены схемы монтажа взрывной сети с изохронами инициирования. Во врубе (конт-

рольном ряду) приняты замедления 67 мс, в диагоналях (эшелонах) 42 мс. Скважины расположены по координатам маркшейдерских замеров, что позволяет учитывать фактические отклонения сетки бурения при расчете изохрон инициирования. Усредненные значения ЛНС и РМС для исследуемых блоков сведены в табл. 2.

Несмотря на описанные технические трудности при определении фактических значений ЛНС и РМС рекомендуется принимать наиболее близкие значения с учетом изохрон инициирования и учитывать их в модели Кузнецова-Рамллера для прогнозирования кумулятивной кривой ВГМ.

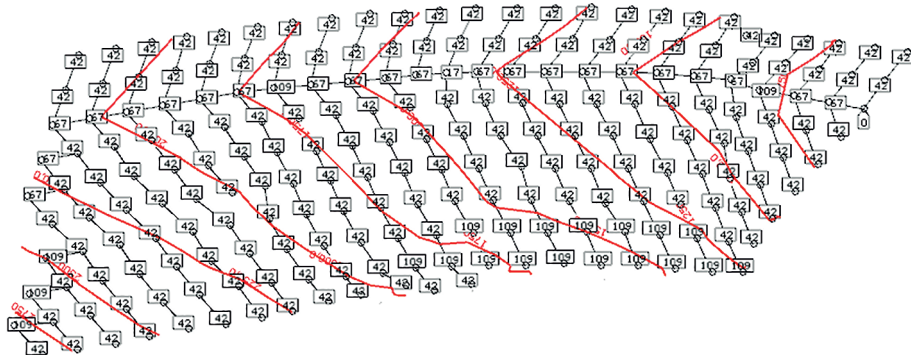


Рис. 4. Схема монтажа взрывной сети с изохронами инициирования блока № 2
 Fig. 4. Initiation patterns with isochrons of initiation of block No. 2

Таблица 3

Параметры распределения Кузнецова-Рамлера
Kuz-Ram distribution parameters

Наименование параметра	Значение					
	№ блока	1	2	3	4	5
x_c — средневзвешенный размер, см						
Расчетное значение по параметрам проектной сетки бурения		50	54	51	37,5	33
Расчетное значение с учетом изохрон инициирования		49	55	45	39	31
Экспериментальное значение по данным обработки в ПО «WipFrag»		48,7	54,8	47	41	33
n — индекс однородности						
Расчетное значение по параметрам проектной сетки бурения		1,39	1,38	1,38	1,43	1,53
Расчетное значение с учетом изохрон инициирования		1,8	1,65	2,64	1,97	2, 19
Экспериментальное значение по данным обработки в ПО «WipFrag»		1,82	1,69	2,68	1,94	2,3

Для сравнения в табл. 3 сведены прогнозные параметры распределения Кузнецова-Рамлера согласно проектной сетке бурения, «динамической сетки» с учетом изохрон инициирования и экспериментальные данные в результате обработки изображений в ПО «WipFrag».

Сравнение параметров распределения Кузнецова-Рамлера по табл. 3 показывает, что учет изохрон инициирования позволяет достичь лучшего согласования с экспериментальными кривыми распределения грансостава ВГМ по показателю однородности распределения кусков n , а также x_c средневзвешенного размера куска горной массы.

Выводы

1. Принятые параметры инициирования скважинных зарядов значительно влияют на фактическое распределение грансостава взорванной горной массы. В зависимости от схемы инициирования и номиналов замедлений врубных

и эшелонных поверхностных сетей изменяются значения линии наименьшего сопротивления и расстояния между скважинными зарядами при массовом взрыве.

2. В модели Кузнецова-Рамлера зачастую принимают проектные значения сетки скважин на бурение (расстояние между рядами и расстояние между скважинами), при этом расчеты показывают, что прогнозные распределение грансостава взорванной горной массы по данным проектной сетки бурения может отличаться от фактического до 50%.

3. При прогнозировании распределения грансостава взорванной горной массы по модели Кузнецова-Рамлера рекомендуется принимать фактические («динамические») значения сетки скважин, которые формируются изохронами инициирования. Расчеты с учетом изохрон инициирования показывают высокую сходимость с фактическим распределением грансостава взорванной горной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marinina O. A., Kirsanova N. Y., Nevskaya M. A.* Circular economy models in industry: developing a conceptual framework // *Energies*. 2022, vol. 15, no. 24, pp. 9376 – 9386. DOI: 10.3390/en15249376.

2. *Фомин С. И., Овсянников М. П.* Обоснование оптимальных технико-экономических параметров карьера при этапной разработке рудных крутопадающих месторождений // *Записки Горного института*. – 2022. – Т. 000. – С. 1 – 10. DOI: 10.31897/pmi.2022.73.

3. *Аленичев И. А., Рахманов Р. А.* Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 249. – С. 334 – 341. DOI: 10.31897/pmi.2021.3.2.

4. *Workman L., Eloranta J.* The effects of blasting on crushing and grinding efficiency and energy consumption / *Proceedings of the 29th Conference on Explosives and Blasting Techniques*. International Society of Explosive Engineers, USA. 2003, vol. 1, pp. 131 – 140.

5. *Yastrebova K., Moldovan D., Chernobay 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, no. 4, article 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017.

6. *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.

7. *Хохлов С. В., Виноградов Ю. И., Носков А. П., Баженова А. В.* Прогнозирование смещения рудных контуров при формировании развала взорванной горной массы // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 3. – С. 40 – 56. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_40.

8. *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

9. *Жариков И. Ф.* Регулирование степени дробления при взрывании высоких уступов // *Взрывное дело*. – 2014. – № 111/68. – С. 93 – 100.

10. *Ишейский В. А., Мартынушкин Е. А., Васильев А. С., Смирнов С. А.* Особенности сбора данных в процессе бурения взрывных скважин для формирования геоструктурных блочных моделей // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2021. – Т. 13. – № 4(50). – С. 608 – 619. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619.

11. *Вохмин С. А., Курчин Г. С., Шевнина Е. В., Кирсанов А. К., Костылев С. С.* Прогнозирование гранулометрического состава отбитой горной массы при отработке месторождений открытым способом // *Известия вузов. Горный журнал*. – 2020. – № 1. – С. 14 – 24. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-14-24.

12. *Виноградов Ю. И., Михайлов В. А., Макарьев В. П., Головин Г. М., Деев Е. А.* Постоянство логарифмической дисперсии распределения размеров кусков при разрушении горных пород / *Физические процессы горного производства*. – Л., 1976. – С. 37 – 41.

13. *Кутепова Н. А., Мосейкин В. В., Кондакова В. Н., Поспехов Г. Б., Страупник И. А.* Особенности инженерно-геологических свойств отходов углеобогащения в связи с их складированием // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 12. – С. 77 – 93. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_77.

14. *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.

15. *Виноградов Ю. И., Хохлов С. В., Баженова А. В., Соколов С. Т.* Методические принципы измерения кусковатости горной массы // *Известия Тульского государственного университета. Наука о Земле*. – 2020. – № 3. – С. 112 – 123.

16. Барон Л. И., Сиротюк Г. Н. Проверка применимости уравнения Розина-Раммлера для вычисления диаметра среднего куска при взрывной отбойке горных пород // Взрывное дело. — 1967. — № 62/19. — С. 111 — 121.

17. Weibull W. A. A statistical distribution punetion op wide applicability // Journal Application Mechanic. 1951, vol. 18, no. 293, pp. 837 — 843.

18. Репин Н. Я., Бирюков А. В. О применении вероятностного метода при исследовании кусковатости горных пород // Известия вузов. Горный журнал. — 1972. — № 7. — С. 11 — 21.

19. Ouchterlony F. Fragmentation characterization; the Swebrec function and its use in blast engineering / Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting — Fragblast 9. Granada, Spain, 13 — 17 August, 2009, pp. 3 — 22.

20. Coello-Velázquez A. L., Arteaga V. Q., Menéndez-Aguado J. M., Pole F. M., Llorente L. Use of the swebrec function to model particle size distribution in an industrial-scale Ni-Co ore grinding circuit // Metals. 2019, vol. 9, no. 8, article 882. DOI: 10.3390/met9080882.

21. Sanchidrián J. A., Segarra P., Ouchterlony F., Gómez S. The influential role of powder factor vs. delay in full-scale blasting: a perspective through the fragment size-energy fan // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2022, vol. 55, no. 5, pp. 4209 — 4236. DOI: 10.1007/s00603-022-02856-1.

22. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. — М.: Наука, 1990. — 215 с.

23. Couceiro P., Santos B. The influence of blasting energy factor on the loading performance // International Journal of Engineering Research & Technology. 2019, vol. 8, no. 12, pp. 731 — 734. DOI: 10.17577/IJERTV8IS120360.

24. Zhang Z. X., Sanchidrián A. J., Ouchterlony F., Luukkanen S. Reduction of fragment size from mining to mineral processing. A review // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2023, vol. 56, pp. 747 — 778. DOI: 10.1007/s00603-022-03068-3.

25. Колмогоров А. Н. О логарифмически нормальном распределении размеров частиц при дроблении // ДАН СССР. — 1941. — Т. 31. — № 2. — С. 103 — 106.

26. Родионов В. Н. О подобию процесса дробления при взрывах разного масштаба / Механизм разрушения горных пород взрывом. — Киев: Наукова думка, 1971. — С. 107 — 112.

27. 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, vol. 50, no. 4, pp. 751 — 779. DOI: 10.1007/s00603-016-1094-x.

28. Кузнецов В. М. Математические модели взрывного дела. — Новосибирск: Наука, 1977. — 259 с.

29. Maerz N. H., Palangio T. C., Franklin J. A. WipFrag image based granulometry system / Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation. Montreal, Quebec, Canada, 1996, pp. 91 — 99.

30. 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. — С. 111 — 125. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_111.

31. Cunningham C. V. B. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting / Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Lulea, Sweden, August. 1983, pp. 439 — 454.

32. Cunningham C. V. B. Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model — four years on / Proceedings of the Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Keystone, Colorado. 1987, pp. 475 — 478.

33. Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование // Записки Горного института. — 2022. — Т. 257. — С. 822 — 832. DOI: 10.31897/rmi.2022.84.

34. *Cunningham C. V. B.* The Kuz-Ram Fragmentation Model – 20 Years on / Proceedings of the 3rd European Federation of Explosives Engineers World Conference on Explosives and Blasting, Brighton. 2005, vol. 4, pp. 201 – 210.

35. *Rosin P., Rammler E.* The laws governing the fineness of powdered coal // Journal of the Institute of Fuel. 1933, vol. 7, no. 6, pp. 29 – 36. **MIAB**

REFERENCES

1. Marinina O. A., Kirsanova N. Y., Nevskaya M. A. Circular economy models in industry: developing a conceptual framework. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 24, pp. 9376 – 9386. DOI: 10.3390/en15249376.

2. Fomin S. I., Ovsyannikov M. P. Substantiation of the optimal performance parameters for a quarry during the stage-wise development of steeply dipping ore deposits. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 000, pp. 1 – 10. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2022.73.

3. Alenichev I. A., Rakhmanov R. A. Empirical regularities investigation of rock mass discharge by explosion on the free surface of a pit bench. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 334 – 341. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2021.3.2.

4. Workman L., Eloranta J. The effects of blasting on crushing and grinding efficiency and energy consumption. *Proceedings of the 29th Conference on Explosives and Blasting Techniques*. International Society of Explosive Engineers, USA. 2003, vol. 1, pp. 131 – 140.

5. Yastrebova K., Moldovan D., Chernobay 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, no. 4, article 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017.

6. 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.

7. Khokhlov S. V., Vinogradov Yu. I., Noskov A. P., Bazhenova A. V. Predicting displacements of ore body boundaries in generation of blasted rock pile. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 3, pp. 40 – 56. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_40.

8. Rakhmanov R. A., Loeb J., Kosukhin N. I. Estimation of ore contour movements 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

9. Zharikov I. F. Rock fragmentation adjustment in high bench blasting. *Explosion technology*. 2014, no. 111/68, pp. 93 – 100. [In Russ].

10. Isheyskiy V. A., Martynskin E. A., Vasilyev A. S., Smirnov S. A. Data collection features of during the blast wells drilling for the formation of geostructural block models. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 4(50), pp. 608 – 619. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619.

11. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Shevnina E. V., Kirsanov A. K., Kostylev S. S. Granulometric composition predicting models after explosion in open-pit mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 14 – 24. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-14-24.

12. Vinogradov Yu. I., Mikhailov V. A., Makaryev V. P., Golovin G. M., Deev E. A. The constancy of the logarithmic dispersion of the size distribution of the pieces during the destruction of rocks. *Fizicheskie protsessy gornogo proizvodstva* [Physical processes of mining production], Leningrad, 1976, pp. 37 – 41.

13. Kutepova N. A., Moseykin V. V., Kondakova V. N., Posphehov G. B., Straupnik I. A. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12, pp. 77 – 93. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_77.

14. 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.

15. Vinogradov Yu. I., Khokhlov S. V., Bazhenova A. V., Sokolov S. T. Methodological principles of measuring granulometric composition. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 3, pp. 112 – 123. [In Russ].

16. Baron L. I., Siroyuk G. N. Verification of the applicability of the Rozin-Rammler equation for calculating the diameter of an average piece during explosive rock breaking. *Explosion technology*. 1967, no. 62/19, pp. 111 – 121. [In Russ].

17. Weibull W. A. A statistical distribution punetion op wide applicability. *Journal Application Mechanic*. 1951, vol. 18, no. 293, pp. 837 – 843.

18. Repin N. Ya., Biryukov A. V. On the application of the probabilistic method in th study of lumpiness of rocks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 1972, no. 7, pp. 11 – 21. [In Russ].

19. Ouchterlony F. Fragmentation characterization; the Swebrec function and its use in blast engineering. *Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting – Fragblast 9*. Granada, Spain, 13 – 17 August, 2009, pp. 3 – 22.

20. Coello-Velázquez A. L., Arteaga V. Q., Menéndez-Aguado J. M., Pole F. M., Llorente L. Use of the swebrec function to model particle size distribution in an industrial-scale Ni-Co ore grinding circuit. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 8, article 882. DOI: 10.3390/met9080882.

21. Sanchidrián J. A., Segarra P., Ouchterlony F., Gómez S. The influential role of powder factor vs. delay in full-scale blasting: a perspective through the fragment size-energy fan. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, vol. 55, no. 5, pp. 4209 – 4236. DOI: 10.1007/s00603-022-02856-1.

22. Zamyshlyayev B. V., Evterev L. S. *Modeli dinamicheskogo deformirovaniya i razrusheniya gruntovykh sred* [Models of dynamic deformation and destruction of soil media], Moscow, Nauka, 1990. 215 p.

23. Couceiro P., Santos B. The influence of blasting energy factor on the loading performance. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2019, vol. 8, no. 12, pp. 731 – 734. DOI: 10.17577/IJERTV8IS120360.

24. Zhang Z. X., Sanchidrián A. J., Ouchterlony F., Luukkanen S. Reduction of fragment size from mining to mineral processing. A review. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023, vol. 56, pp. 747 – 778. DOI: 10.1007/s00603-022-03068-3.

25. Kolmogorov A. N. On the logarithmically normal law of particle size distribution during crushing. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1941, vol. 31, no. 2, pp. 103 – 106. [In Russ].

26. Rodionov V. N. On the similarity of the crushing process in ore-scale explosions. *Mekhanizm razrusheniya gornykh porod vzryvom* [The mechanism of destruction of rocks by explosion] Kiev, Naukova dumka, 1971, pp. 107 – 112.

27. 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, vol. 50, no. 4, pp. 751 – 779. DOI: 10.1007/s00603-016-1094-x.

28. Kuznetsov V. M. *Matematicheskie modeli vzryvnogo dela* [Mathematical models of explosive business], Novosibirsk, Nauka, 1977, 259 p.

29. Maerz N. H., Palangio T. C., Franklin J. A. WipFrag image based granulometry system. *Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation*. Montreal, Quebec, Canada, 1996, pp. 91 – 99.

30. 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. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 6, pp. 111 – 125. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_111.

31. Cunningham C. V. B. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. *Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Lulea, Sweden, August. 1983, pp. 439 – 454.

32. Cunningham C. V. B. Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model – four years on. *Proceedings of the Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Keystone, Colorado. 1987, pp. 475 – 478.

33. Saadoun A., Fredj M., Boukarm R., Hadji R. Fragmentation analysis using digital image processing and empirical model (KuzRam): a comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 822 – 832. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2022.84.

34. Cunningham C. V. B. The Kuz-Ram Fragmentation Model – 20 Years on. *Proceedings of the 3rd European Federation of Explosives Engineers World Conference on Explosives and Blasting*. Brighton, 2005, vol. 4, pp. 201 – 210.

35. Rosin P., Rammler E. The laws governing the fineness of powdered coal. *Journal of the Institute of Fuel*. 1933, vol. 7, no. 6, pp. 29 – 36.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маринин Михаил Анатольевич¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,

Афанасьев Павел Игоревич¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Afanasev_PI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5271-6121,

Сушкова Вероника Ивановна¹ – ведущий специалист,
e-mail: Sushkova_VI@pers.spmi.ru,

Устименко Кирилл Дмитриевич¹ – студент-исследователь,
e-mail: s201036@stud.spmi.ru,

Ахметов Адиль Русланович¹ – студент-исследователь,
e-mail: s201038@stud.spmi.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Маринин М.А., e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Marinin¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,

e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,

P.I. Afanasyev¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,

e-mail: Afanasev_PI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5271-6121,

V.I. Sushkova¹, Leading Specialist,
e-mail: Sushkova_VI@pers.spmi.ru,

K.D. Ustimenko¹, Research Student,
e-mail: s201036@stud.spmi.ru,

A.R. Akhmetov¹, Research Student,
e-mail: s201038@stud.spmi.ru,

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

Corresponding author: M.A. Marinin, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 21.07.2023; получена после рецензии 16.08.2023; принята к печати 10.08.2023.

Received by the editors 21.07.2023; received after the review 16.08.2023; accepted for printing 10.08.2023.