

УДК 622.235

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗОРВАННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД**А. В. Шапурин, Я. В. Васильчук**

Криворожский национальный университет

ул. XXII партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: vasilchuk-yaroslav@rambler.ru

В. Н. Носов

ЧАО «Интервзрывпром», г. Кривой Рог

ул. Коломойцевская, 1, г. Кривой Рог, 50057, Украина.

На основе данных, полученных в условиях гранитных и железорудных карьеров Украины, разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать гранулометрический состав взорванных горных пород. Модель основана на законе Розина–Раммлера, эмпирической формуле для прогнозирования среднего медианного размера куска взорванной горной породы и эмпирическом коэффициенте, который характеризует однородность дробления массива горных пород взрывом. Точность прогнозирования модели была проверена в ходе промышленных взрывов.

Ключевые слова: гранулометрический состав, математическая модель, средний медианный размер куска породы.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПІДІРВАНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД**А. В. Шапурин, Я. В. Васильчук**

Криворізький національний університет

вул. XXII партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: vasilchuk-yaroslav@rambler.ru

В. Н. Носов

ПАТ «Інтервибухпром», м. Кривий Ріг

вул. Коломойцевська, 1, м. Кривий Ріг, 50057, Україна.

На основі даних, отриманих в умовах гранітних і залізорудних кар'єрів Україні, розроблено математичну модель, що дозволяє прогнозувати гранулометричний склад підірваних гірських порід. Модель базується на законі Розіна–Раммлера, емпіричній формулі для прогнозування середнього медіанного розміру куска підірваної гірської породи і емпіричному коефіцієнті, який характеризує однорідність дроблення масиву гірських порід вибухом. Точність прогнозування моделі була перевірена в ході промислових вибухів.

Ключові слова: гранулометричний склад, математична модель, середній медіанний розмір куска породи.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Многие исследователи занимались разработкой математических моделей, позволяющих прогнозировать распределение взорванных горных пород по фракциям.

В разработке таких моделей существует три подхода:

1) *Эмпирический* – основан на простой логике: чем больше значение энергии на входе, тем интенсивнее дробление.

2) *Механистический* – основанный на моделировании процессов детонации и распространения энергии в породах.

3) *Эмпирико-статистический* – основанный на той же логике, что и эмпирический, но с существенной корректировкой согласно статистическим данным.

Необходимо отметить, что во всех этих моделях не учитывается состояние массива, в котором генерируются трещины от предыдущих взрывов. Основная проблема при использовании моделей – это большое количество показателей, необходимых для точного прогнозирования гранулометрического состава. При большом количестве взрывающихся блоков за один массовый взрыв (количество блоков может достигать 20 и более), затруднительно получить данные для этих моделей в каждом отдельном случае, поэтому возникла идея разработки математиче-

ской модели, более подходящей к условиям наших месторождений.

Следует отметить, что на сегодняшний день наиболее известная и широко используемая эмпирическая модель Куз–Рам [1].

Каннингем [2] предложил использовать кривую Розина–Раммлера для описания гранулометрического состава как механически измельченных, так и взорванных горных пород. Средний размер куска взорванной породы для этого распределения может быть определен из уравнения Кузнецова [3], но, чтобы правильно определить кривую Розина–Раммлера, необходим был показатель n из следующего уравнения:

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

где R – процент непросяянного материала; x – размер сита; x_c – эмпирическая константа; n – индекс однородности.

Комбинация этих алгоритмов, таким образом, совместно с уравнением Кузнецова, стала известна, как «Модель Куз–Рам».

Уравнение индекса однородности:

$$n = \left(2.2 - \frac{14 \cdot B}{d} \right) \left(\frac{1 + S/B}{2} \right) \cdot \left(1 - \frac{W}{B} \right) \cdot \left(\text{abs} \left(\frac{BCL - CCL}{L} \right) + 0.1 \right)^{0.1} \cdot \frac{L}{H} \cdot C(n); \quad (2)$$

где B – расстояние между рядами, м; S – расстояние между скважинами, м; d – диаметр скважины, мм; W – стандартное отклонение точности бурения, м; L – длина заряда, м; BCL – нижняя часть заряда, м; CCL – длина колонки заряда, м; H – высота уступа, м, $C(n)$ – корректирующий фактор.

Каннингем дополнил уравнение Кузнецова таким образом, чтобы его можно было применять для других видов взрывчатых веществ (ВВ). Уравнение приобрело вид:

$$x_0 = AK^{-0.8} \cdot Q^{1/6} \cdot \left(\frac{115}{RWS} \right)^{19/20}, \quad (3)$$

где x_0 – размер среднего куска, см; A – фактор горной породы (варьируется между 0,8 и 22); K – удельный расход ВВ, кг/м³; Q – масса ВВ в скважине, кг; RWS – относительный эквивалент ВВ по теплоте взрыва по отношению к АНФО; 115 – это RWS ТНТ.

Фактор геологических характеристик: Фактор А.

Довольно сложно определить реальное влияние геологии, но некоторые из главных свойств пород заложены в фактор A :

$$A = (RMD + RDI + HF) \times C(A), \quad (4)$$

где RMD – описание массива горных пород; RDI – влияние плотности; HF – фактор жесткости; $C(A)$ – корректирующий фактор (0,5–2).

Результаты анализа модели Куз–Рам.

Модель Куз–Рам доминировала в области прогнозирования гранулометрического состава взорванной горной породы на протяжении последних 30 лет. За эти годы к ней были высказаны следующие замечания:

1. Анализ исследований Кузнецова В.М. [3] показал, что его формула для прогнозирования размера среднего осколка определяет не его среднее медианное значение, а средневзвешенное. Поэтому не совсем корректно использовать это значение для определения характерного размера куска данного массива.

2. Отмечена слабая способность модели прогнозировать выход мелких фракций.

3. В.М. Кузнецов недостатками своей формулы называл схематичность учета физико-механических свойств горных пород, а также проверку формулы только на простейших схемах взрывания.

4. Для учета состояния массива горных пород при моделировании используются такие субъектив-

ные характеристики, как массив, блочный, порошкообразный.

5. Относительный эквивалент ВВ по теплоте взрыва определяется исходя только лишь из энергетических характеристик ВВ, что возможно только при полном химическом превращении продуктов детонации. Теплота взрыва эмульсионных ВВ ниже, чем АНФО, однако полнота химического превращения продуктов детонации для эмульсионных ВВ достигает 97 %, а для АНФО, в лучшем случае, 50 %. Поэтому некорректно принимать относительную силу ЭВВ по АНФО около 80 %. Необходимо учитывать полноту реакции.

В связи с вышеизложенным целью работы является: разработать зависимость, позволяющую определить средний медианный размер куска; скорректировать индекс однородности n путем смены приоритетов при определении влияющих факторов; разработать модель, аналогичную модели Куз–Рам; выполнить сравнительный анализ результатов, полученных при математическом моделировании взрыва при помощи модели Куз–Рам и новой модели в таблицах Excel.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Авторами была предложена эмпирическая формула [4] для определения размера среднего медианного размера куска взорванной горной породы, в которой присутствует диаметр заряда в увязке с параметром сетки скважин (W). Они, в данном случае, по смыслу играют роль удельного расхода ВВ. Каждая из составляющих математического выражения влияет на размер среднего куска в развале соответственно степени, в которую возведен:

$$d_m = k \times \left(\frac{W}{d_{скв}} \right)^{0.74} \times \frac{D_{cp}^{0.55} f^{0.3}}{(\Delta \times Q)^{0.3}}, \quad (5)$$

где k – размерный коэффициент,

$k = \left(\frac{\kappa Дж}{м^{-0.4}} \right)^{0.3}$; D_{cp} – средний размер блока в мас-

сиве пород, м; f – коэффициент крепости пород по проф. М.М. Протодяконову; Δ – плотность зарядания, кг/м³; Q – теплота взрыва (энергия) ВВ, кДж/кг; $d_{скв}$ – диаметр скважины, м; W – параметр квадратной сетки скважин, м.

Степень влияния каждого параметра на средний медианный размер куска определялась при помощи анализа результатов экспериментально-промышленных взрывов на карьерах рудной и нерудной промышленности. Как вспомогательное оборудование применялось программное обеспечение для определения гранулометрического состава «WipFrag».

Используем выражение (5) для определения размера среднего медианного куска. Новая модель будет называться «модель РКШВ»

Корректировка индекса однородности n.

Авторами проведено усовершенствование индекса *n* путем смены приоритетов. Выделены следующие факторы, реально влияющие на равномерность дробления:

1. Анизотропия массива (A_m). Определяется ориентацией преобладающей системы трещин.
2. Фактор взаимного расположения слоев горных пород и оси заряда при условии отбойки в сторону свободной поверхности (B_a). Отметим, что данный фактор возможно корректировать путём изменения угла наклона скважины.
3. Фактор геометрических параметров сетки скважин (P) – шахматная или квадратная.
4. Фактор складчатости массива горных пород (F): наличие в массиве складок высоких порядков, отсутствие складок.
5. Степень влияния фактора отклонения от проекта ($1-D/B$), где D – фактическое отклонение.
6. Фактор длины неактивной части скважины $\frac{L}{H}$.

Таким образом, математическое выражение для определения индекса однородности *n* будет иметь вид:

$$n = 2 \cdot \left(A_m \cdot B_a \cdot P \cdot F \cdot (1 - D/B) \cdot \left(\frac{L}{H} \right)^{0,3} \right) \cdot C(n), \quad (6)$$

где A_m – фактор анизотропии массива; D – отклонение от проекта, м; B – расстояние между рядами скважин, м; P – фактор влияния сетки скважин, B_a – фактор взаимного расположения слоев горных пород и заряда, F – фактор складчатости массива г.п., L – длина заряда, м; H – высота уступа, м; $C(n)$ – корректирующий фактор.

Диапазон изменений значений факторов, которые влияют на величину индекса однородности *n*, представлен в табл. 1. Индекс *n* в пределах (0,4–2).

Таблица 1 – Диапазон изменения значений факторов

Фактор	Степень влияния фактора на величину индекса однородности <i>n</i>
A_m	0,68–1
B_a	0,85–1
F	0,85–1
P	0,62–1
$(1-D/B)$	0,8–1

Результаты работы были проверены на примере взрывов на двух гранитных карьерах – Лезниковском и Новгородецком.

Вводные данные для модели Куз–Рам (соответственно Новгородецкий карьер; Лезниковский карьер). Свойства породы: тип – гранит; плотность – 2,8; 2,6 т/м³. Геологические особенности: толщина слоя в плане – 0,3; 0,3 м; угол падения пласта – 70 град. в сторону откоса уступа; 150 град. вкрест откосу уступа; угол залегания слоев – 0 град; 30 град.; размер отдельности в массиве – 0,65; 0,82 м;

Фактор JCF: сильно сцепленные – 1. Свойства ЭВВ (Анемикс 70): плотность – 1220 кг/м³; относительный эквивалент ВВ по теплоте взрыва – 80 %; теплота взрыва – 3117 кДж/кг.

Параметры БВР: диаметр скважины – 150 мм; высота уступа – 13,5; 14 м; расстояние между рядами скважин (РМР) – 4,2; 4,4 м; расстояние между скважинами в ряду (РМС) – 4,8; 4,9 м; перебур – 1,5 м; количество скважин – 108; 80 шт.; фактически взорванный объём – 29625 м³; 24150 м³; удельный расход ВВ (фактический) – 0,74; 0,9 кг/м³; длина заряда (фактическая) – 12,15; 10,1 м; забойка (фактическая) – 2,85; 5,4 м; угол откоса уступа – 70 град.; отклонение от паспорта ведения БВР (в среднем) – 0,3 м.

Вводные данные для модели РКШВ (соответственно Новгородецкий карьер; Лезниковский карьер). Свойства породы: тип – гранит; плотность – 2,8; 2,6 т/м³; коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова – 11. Геологические особенности: угол падения слоев – 30 град. (в сторону откоса уступа); 150 град. (вкрест откосу уступа); угол залегания слоев – 0 град; 30 град.; размер отдельности в массиве – 0,65; 0,82 м. Свойства ВВ (Анемикс): плотность ВВ – 1220 кг/м³; теплота взрыва – 3117 кДж/кг. Параметры БВР: диаметр скважины – 150 мм; высота уступа – 13,5; 14 м; РМР – 4,2; 4,4 м; РМС – 4,8; 4,9 м; перебур – 1,5 м; количество скважин – 108; 80 шт.; фактически взорванный объём – 29625 м³; 24150 м³; удельный расход ВВ (фактический) – 0,74; 0,9 кг/м³; длина заряда (фактическая) – 12,15; 10,1 м; забойка (фактическая) – 2,85; 5,4 м; угол откоса уступа – 70 град.; отклонение от паспорта ведения БВР (в среднем) – 0,3 м; Фактор A_m – 0,86; 1; Фактор B_a – 0,85, 0,85; Фактор F – 1; 1; Фактор P – 1; 0,98.

Негабарит – 1,2 м; оптимальный размер – 0,5 м; переизмельчение – 0,01 м. Результаты сравнения в табл. 2, анализ которых показывает, что отклонение расчетного размера среднего куска от экспериментального по модели РКШВ не превышает 12 %, тогда как по модели Куз–Рам для Лезниковского карьера отклонение составило 30,6 %. Это говорит о более высокой гибкости и универсальности формулы для определения среднего медианного куска в модели РКШВ, чем в модели Куз–Рам.

Далее сравним гранулометрический состав, который прогнозируют модели РКШВ и Куз–Рам для Лезниковского и Новгородецкого карьеров с фактическими данными.

Анализ взрыва показал, что обе модели достаточно хорошо описали гранулометрическую кривую взорванной горной массы (табл. 3, рис. 1). Отметим,

что модель РКШВ показала несколько заниженное значение среднего медианного размера куска, а модель Куз–Рам – завышенное.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики результатов экспериментов

Название предприятия	Экспериментальный средний медианный кусок, м	Теоретический средний медианный кусок (модель РКШВ), м	Отклонение от экспериментального значения, %	Теоретический средний кусок (модель Куз–Рам), м	Отклонение от экспериментального значения, %	Индекс n (модель РКШВ)	Индекс n (модель Куз–Рам)
Новгородский к-р (25.04.2012)	0,230	0,203	11,7	0,25	8,7	1,32	1,54
Лезниковский к-р (24.04.2012)	0,245	0,238	2,9	0,32	30,6	1,41	1,21

Таблица 3 – Сравнение гранулометрического состава взорванной горной породы, прогнозируемого моделями Куз-Рам и РКШВ с результатами анализа WipFrag для Новгородского карьера

Модель РКШВ			Модель Куз-Рам			WipFrag		
Процент просеянной горной массы, %	Размер ячейки сита, м	Выход фракции, %	Процент просеянной горной массы, %	Размер сита, м	Выход фракции, %	Процент просеянной горной массы, %	Размер сита, м	Выход фракции, %
1,32	0,01	1,32	0,49	0,01	0,49	0,00	0,01	0,00
59,93	0,25	59,93	50,45	0,25	32,45	56,10	0,25	56,10
81,67	0,40	21,75	76,49	0,40	26,04	82,80	0,40	82,80
94,46	0,60	12,78	93,30	0,60	16,81	93,10	0,60	93,10
98,53	0,80	4,08	98,51	0,80	5,22	96,50	0,80	96,50
99,97	1,30	0,31	99,99	1,30	0,02	100,00	1,30	100,00
99,99	1,40	0,03	100,00	1,40	0,01			
100,00	1,70	0,00	100,00	1,50	0,00			

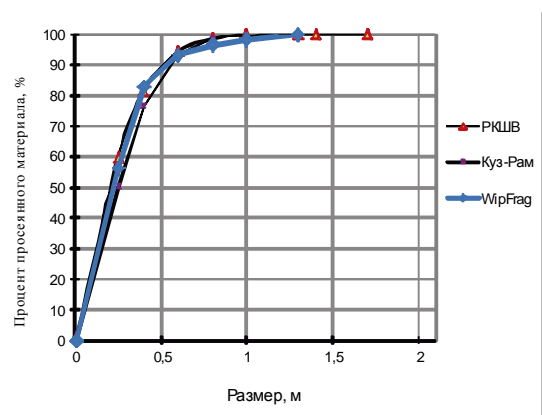


Рисунок 1 – Графики, прогнозирующие гранулометрический состав для Новгородского карьера (Куз–Рам и РКШВ) и график фактического гранулометрического состава, определенный при помощи WipFrag

Отклонение показателей для фракций 250, 400 и 600 мм:

1. По модели РКШВ – 3,8, 1,3 и 2,1 %;
2. По модели Куз–Рам – 10, 7,6 и 0,2 %.

Для Лезниковского карьера был сделан аналогичный анализ (табл. 4).

Анализ взрыва на Лезниковском карьере показал (табл. 4, рис. 2), что модель Куз–Рам дает завышенное значение среднего куска горной массы и, наоборот, заниженный показатель индекса однородности, что приводит к погрешностям при прогнозировании гранулометрического состава.

Отклонение показателей для фракций 250, 400 и 600 мм:

1. По модели РКШВ – 2,4, 3,3 и 5,1 %;
2. По модели Куз–Рам – 20,48, 23,06 и 11,3 %.

Отметим, что вследствие заниженного значения индекса однородности по модели Куз–Рам, выход негабарита составил 3,1 %, тогда, как программа WipFrag показала нулевой выход негабарита, а модель РКШВ – 0,1 %.

Таблиця 4 – Сравнение гранулометрического состава взорванной горной породы, прогнозируемого моделями Куз–Рам и РКШВ с результатами анализа WipFrag для Лезниковского карьера

Модель РКШВ			Модель Куз–Рам			WipFrag		
Процент просеянной горной массы, %	Размер ячейки сита, м	Выход фракции, %	Процент просеянной горной массы, %	Размер сита, м	Выход фракции, %	Процент просеянной горной массы, %	Размер сита, м	Выход фракции, %
1,32	0,01	1,32	0,49	0,01	0,49	0,00	0,01	0,00
59,93	0,25	59,93	50,45	0,25	32,45	56,10	0,25	56,10
81,67	0,40	21,75	76,49	0,40	26,04	82,80	0,40	82,80
94,46	0,60	12,78	93,30	0,60	16,81	93,10	0,60	93,10
98,53	0,80	4,08	98,51	0,80	5,22	96,50	0,80	96,50
99,65	1,00	1,12	99,73	1,00	1,22	98,30	1,00	98,30
99,97	1,30	0,31	99,99	1,30	0,02	100,00	1,30	100,00
99,99	1,40	0,02	100,00	1,40	0,01			
100,00	1,70	0,00	100,00	1,50	0,00			

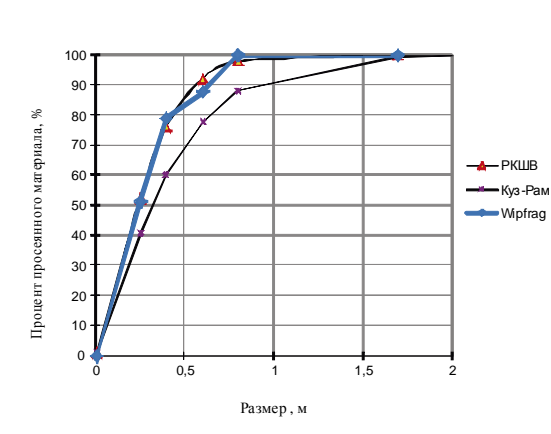


Рисунок 2 – Графики, прогнозирующие гранулометрический состав для Лезниковского карьера (Куз–Рам и РКШВ) и график фактического гранулометрического состава, определенный при помощи WipFrag

ВЫВОДЫ.

1. Исходя из опыта, накопленного на протяжении десятилетий, большого количества экспериментальных взрывов и лабораторных исследований, была разработана зависимость, позволяющая определить средний медианный размер куска.
2. Скорректирован индекс неоднородности n путём смены определяющих факторов.
3. Разработана математическая модель РКШВ, основанная на идее математической модели Куз–Рам.
4. В модели РКШВ используются параметры, имеющиеся в типовых паспортах БВР. Анализ результатов математического моделирования с помощью Куз–Рам и РКШВ и сравнение их с результатами промышленных взрывов показали применимость обеих моделей для прогнозирования гранулометри-

ческого состава. Модель РКШВ разрабатывалась с учетом особенностей ведения буровзрывных работ и геологии пород месторождений Украины и стран СНГ, поэтому она значительно более проста в применении, а результаты моделирования показывают удовлетворительное соответствие с результатами промышленных взрывов.

5. Математическая модель РКШВ может быть использована как в виде электронных таблиц Excel, так и в прикладном программном обеспечении типа WipFrag, JKSimBlast, Rockmate и т.д.

6. Как и уже существующие математические модели, РКШВ не может абсолютно точно спрогнозировать результаты взрыва, но вполне может служить приблизительным ориентиром перед началом ведения буровзрывных работ, а также позволяет проверить, насколько повлияет изменение определенных параметров БВР на конечный результат – гранулометрический состав горной массы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деменгас В. Анализ фрагментации после оптимизации параметров буровзрывных работ в руднике Айтик: дис. ... магистр. наук / Василиус Деменгас. – Лулеа, 2008. – С. 7–16.
2. Модель Куз–Рам – 20 лет спустя / К.В.Б. Каннингем// Европейская федерация инженеров взрывников: материалы брайтонской конференции. – Брайтон, 2005. – С. 201–210.
3. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела. – Новосибирск: Наука, 1977. – 185 с.
4. Качество дробления горных пород как результат комплексного влияния различных факторов / А.В. Шапулин, Я.В. Васильчук // Вісник Криворізького технічного університету: зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2011. – № 29. – С. 13–17.

**MATHEMATICAL MODEL FOR THE PREDICTION OF BLASTED ROCKS
GRANULOMETRIC COMPOSITION**

A. Shapurin, Y. Vasilchuk

Krivoy Rog National University

vul. XXII partseza, 11, Krivoy Rog, 50027, Ukraine. E-mail: vasilchuk-yaroslav@rambler.ru.

V. Nosov

Intervzriyprom, PJSC

vul. Kolomoitsevska, 1, Krivoy Rog, 50057, Ukraine.

The authors have elaborated a mathematical a model that allows predicting the granulometric composition of blasted rocks, based on data obtained in Ukrainian quarries and open pits. The model is based on Rosin-Rammler distribution, empirical formula for average median size of blasted rock predicting, and the empirical coefficient that describes uniformity of solid rock massive crushing by blast. The accuracy of model prediction was tested at industrial blasts.

Key words: granulometric composition, mathematical model, average median size of blasted rocks.

REFERENCES

1. Demenegas V. *Fragmentation analysis of optimized blasting rounds in the Aitik mine: Master thesis / Vasileios Demenegas.* – Lulea, 2008. – PP. 7–16. [in Russian]

2. Kuz–Ram fragmentation model – 20 years on / C.V.B. Cunningham // *European Federation of Explosive Engineers.* – Brighton, 2011. – PP. 201–210. [in Russian]

3. Kuznetsov V. *Mathematical models of blasting.* – Novosibirsk: Nayka, 1977. – P. 185. [in Russian]

4. The quality of rock fragmentation as a result of the combined effect of various factors/ Y. Vasilchuk, A. Shapurin // *Krivoy Rog technical university: scientific work digest.* – Krivoy Rog, 2011. – № 29. – PP.13–17. [in Russian]

Стаття надійшла 03.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Воробйовим В.В.