

Экспериментальная проверка адекватности фракционно-энергетического подхода к расчету параметров буровзрывных работ по телеметрическим данным

Александров В. Г.
г. Бишкек, Кыргызстан
e-mail: vikal47@rambler.ru

Реферат

Введение. Основной задачей управления параметрами взрывных работ является определение по каждой скважине массы заряда, обеспечивающей заданное качество дробления породы, для чего, по современным представлениям энергетической теории буровзрывных работ (БВР), необходимо знать значения крепости породы и энергоемкости бурения по глубине скважины. В настоящей работе представлен фракционно-энергетический модельный комплекс, связывающий все актуальные параметры БВР, который по входным данным телеметрии бурения рассчитывает выходные параметры бурения-взрывания.

Цель работы. Демонстрация адекватности фракционно-энергетического подхода.

Методология. Основой методологии являются следующие положения: физические отношения параметров бурения, крепости породы и геометрических параметров шарошек долота; закономерности физического подобия фракционных и энергетических параметров разрушения породы бурением и взрыванием; константы бурения, выведенные из закономерностей первого и второго положений.

Результаты. В настоящей работе выполнены расчеты параметров БВР по данным телеметрии бурения экспериментального массива скважин золоторудного карьера Кумтор. Выполнен сравнительный анализ рассчитанных параметров БВР с аналоговыми, фактическими и рассчитанными по модели Кузнецова–Раммлера.

Выводы. Фракционно-энергетический подход адекватно определяет расчетные параметры бурения-взрывания по данным бортовой телеметрии бурения.

Ключевые слова: физическое подобие; энергоемкость; средний кусок; осколок; параметры бурения-взрывания; константы подобия; функциональные константы бурения.

Введение. Золоторудное месторождение Кумтор расположено в горной системе Терской-Алатоо, на северо-западном склоне хребта Акшийряк Киргизской республики на высоте более 4000 м (координаты 41°52' с. ш. и 78°12' в. д.).

Разработка месторождения началась в 1997 г., по состоянию на 30 июня 2022 г. произведено более 13,8 млн унций золота. Вмещающие золотое оруденение породы месторождения Кумтор представляют собой толщу серых филлитов [1] с крепостью от 2 до 10 по шкале М. М. Протодяконова.

Согласно практике проектирования, прогнозирования запасов, разработки рудных месторождений значения физико-механических параметров определяются по кернам геологических скважин, которые располагаются на значительном расстоянии друг от друга и характеризуют эти параметры усредненно. Однако для расчетов скважинных зарядов эти данные неактуальны, так как каждая скважина имеет свои уникальные особенности.

Существующие в настоящее время подходы к определению параметров буровзрывных работ (БВР) имеют ряд недостатков. Механические модели используют

физико-механические параметры, которые не определены к моменту заряжания скважин, например: крепость породы по М. М. Протодяконову f или прочность на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$, коэффициент Пуассона μ , скорость распространения звука в породе C и др. Энергетические модели требуют знания энергоёмкости бурения по скважине и размера среднего куска породы в развале, для расчета по эмпирическим зависимостям значения удельного расхода взрывчатого вещества (ВВ). Статистические модели, в том числе и нейронные [2, 3], требуют большого экспериментального материала с большим объемом данных. При этом в моделях такого рода отсутствуют отношения и физические связи параметров процессов разрушения породы бурением-взрыванием, таких как: константы и инварианты подобия фракционных и энергетических параметров, функциональные константы параметров бурения.

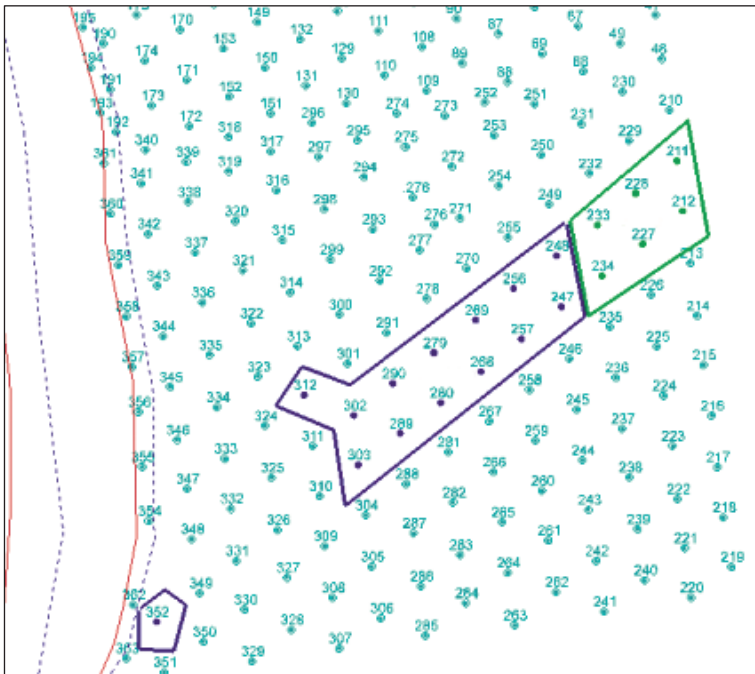


Рисунок 1. Фрагмент блока 3650-34 карьера Кумтор с экспериментальными скважинами: скважины синей зоны заряжены Эмульсолит А-20 с удельным расходом 0,51–0,55 кг/м³, зеленой – Игданитом, с удельным расходом 0,66 кг/м³ (из базы данных проекта бурения)

Figure 1. Fragment of block 3650-34 of the Kumtor open pit with experimental wells: wells in the blue zone are charged with Emulsolite A-20 with a specific consumption of 0.51–0.55 kg/m³, wells in the green zone are charged with Igdanite with a specific consumption of 0.66 kg/m³ (from the drilling project database)

Это обстоятельство не позволяет оперативно и качественно решать задачи управления параметрами БВР в зависимости от реальных текущих значений крепости породного массива, что и определило целевую установку настоящей работы.

Цель работы заключается в демонстрации адекватности модельных значений параметров БВР контрольным.

Методика. Общие положения. Демонстрацию результатов практического применения осуществим на примере экспериментальных данных по 20 скважи-

нам блока 3650-34 карьера Кумтор, полученных 28.06.2018. (рис. 1). Технические характеристики используемых ВВ: Эмульсолит А-20: теплота взрыва 3,8 МДж/кг; плотность 1,25 г/см³; скорость детонации – 5000 м/с; Игданит: теплота взрыва 3,5 МДж/кг; плотность 0,92 г/см³; скорость детонации 5000 м/с. Исходными данными для расчетов являются: параметры бурения (осевая нагрузка на забой, скорость бурения, частота вращения долота); размер среднего осколка бурового шлама; удельный расход ВВ. Текущие значения параметров бурения получены с помощью бортовой системы телеметрии «Кобус» ООО «Бласт Мейкер» (Россия) и фиксировались с временным интервалом в 1 с. Расчетные параметры: крепость породы по шкале М. М. Протодряконова, энергоемкость бурения, момент вращения долота, ожидаемый размер среднего куска породы в развале. Краткая характеристика горных пород блока: материал – филлиты светлые, пустая порода, классификация пород блока – от VI до IIIа по шкале М. М. Протодряконова, изменяется от довольно мягкой до довольно крепкой, по шкале крепости пород $f = 2-10$.

Бурение осуществлялось долотом диаметром 200 мм; тип долота III – ТЗ-ПГВ-200, компания ПТ ООО «Агрострой» (GLUBUR), республика Беларусь; буровые станки DR460-1138 и D55SP-1144.

Отбор проб бурового шлама по скважинам производился с горизонтов 3, 6, 9, 12 м. Средняя глубина скважин 12,8 м. На каждом горизонте отбирали по 4 пробы массой 0,4–0,5 кг. После высушивания проб производили их рассев на лабораторных ситах с диаметром отверстий 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0,5 мм. Взвешивание каждой фракции выполняли на технических весах с точностью до 1 г и далее рассчитывали размер среднего осколка бурового шлама как математическое ожидание полученной статистической выборки.

Теоретические положения. Теоретическая суть модели основывается на следующих положениях:

- физической закономерности отношений параметров бурения, крепости породы и геометрических параметров шарошек долота;
- закономерностях физического подобия фракционных и энергетических параметров разрушения породы бурением и взрыванием;
- константах бурения, выведенных из закономерностей первого и второго положений.

Такой подход к моделированию буровзрывных процессов, в единой взаимосвязанной системе переменных, позволяет с большей адекватностью управлять текущими значениями показателей БВР по данным телеметрии бурения, чем существующие подходы.

На основании теорем подобия физических процессов [4–6], для постоянной крепости породы получены математические выражения фракционно-энергетических констант и инвариантов подобия процессов разрушения породы бурением-взрыванием:

$$E_{\text{бр}} d_{\text{бм}} = E_{\text{вз}} d_{\text{ср}}; \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_{\text{бр}}}{\varepsilon_{\text{вз}}} = 1; \text{ где } \varepsilon_{\text{бр}} = \frac{E_{\text{бр}}}{S_{\text{бм}}}, \varepsilon_{\text{вз}} = \frac{E_{\text{вз}}}{S_{\text{вз}}};$$

$$\frac{E_{\text{бр}}}{E_{\text{вз}}} = \frac{d_{\text{ср}}}{d_{\text{бм}}} = \frac{S_{\text{бм}}}{S_{\text{вз}}} = Q;$$

на основании теоретических закономерностей связи параметров бурения [7, 8] и отношения (1) построены функциональные константы бурения:

$$E_{бр}d_{бм} = \frac{8k_e k_d \sigma_{мд} \xi_2}{d_{ск}^2} \left(\frac{k_1 F_{ос}}{\sigma_{мд} \xi_1} \right)^{4/3} = C0(f);$$

$$k_e k_d F_{ос}^{4/3} = C1(f);$$

$$F_{ос}^{\zeta_1} \left(\frac{n}{v} \right)^{\zeta_2} = C2(f),$$

где $E_{бр}, E_{вз}$ – энергоемкость бурения, взрывания, мДж/м³; $d_{бм}, d_{ср}$ – средний размер осколка бурового шлама и куска породы в развале, м; $\epsilon_{бр}, \epsilon_{вз}$ – удельная поверхностная энергия бурения, взрывания, мДж/м²; $S_{бм}, S_{вз}$ – общая поверхность кусков разрушенной породы бурением, взрыванием, м²; Q – константа подобия; $k_e = b_0 e^{b_1 f} f^{b_2} F_{ос}^{b_3} (n/v)^{b_4}$ – энергетический настроечный коэффициент; $k_d = a_0 e^{a_1 f} f^{a_2} F_{ос}^{a_3} (n/v)^{a_4}$ – фракционный настроечный коэффициент, a_0 – a_4, b_0 – b_4 настроечные коэффициенты; $F_{ос}$ – осевая нагрузка, Н; v – скорость проходки, м/с; n – частота вращения долота, с⁻¹; ζ_1, ζ_2 – суммы степеней подобных переменных, $\zeta_1 = a_3 + b_3 + 4/3; \zeta_2 = a_4 + b_4$.

Графические изображения функциональных констант приведены на рис. 2.

Необходимо отметить, что ввиду отсутствия достаточного объема статистических данных по карьере Кумтор, для построения указанных кривых были использованы данные параметров БВР Гусевогорского месторождения Качканарского ГОК ([9], «Шкала буримости-взрываемости пород Гусевогорского месторождения») для станка СБШ-250МН, при долоте 245 мм.

На основании изложенных ранее положений построена фракционно-энергетическая модель, которая, при известных функциональных константах и константах подобия, позволяет по данным телеметрии бурения рассчитывать для каждой скважины по ее проходке следующие актуальные параметры БВР: крепость породы f ; энергоемкость бурения $E_{бр}$; размер среднего осколка бурового шлама $d_{бм}$; энергоемкость взрывания $E_{вз}$; для каждой скважины удельный расход ВВ – q и интервал межскважинного замедления $\tau_{из}$, при заданном размере среднего куска породы в развале $d_{ср}$. Компьютерное моделирование расчетных параметров БВР выполнялось в вычислительной среде MathCAD 15.

Фракционно-энергетическая модель БВР.

На основании сказанного ранее и физических соотношений, изложенных в работах [5–7], фракционно-энергетическая модель БВР описывается следующими соотношениями.

Момент вращения долота $M_{вр}, Н \cdot м$:

$$M_{вр} = k_e \frac{\xi_2}{\sigma_{мд}^{1/3}} \left(\frac{k_1 F_{ос}}{\xi_1} \right)^{4/3}, \tag{2}$$

$$\sigma_{мд} = 1,3 \cdot 10^9 [1 + 0,079(f - 15) + 0,0019(f - 15)^2]. \tag{3}$$

Крепость породы f :

$$F_{ос}^{\zeta_1} \left(\frac{n}{v} \right)^{\zeta_2} - C2(f) = 0. \tag{4}$$

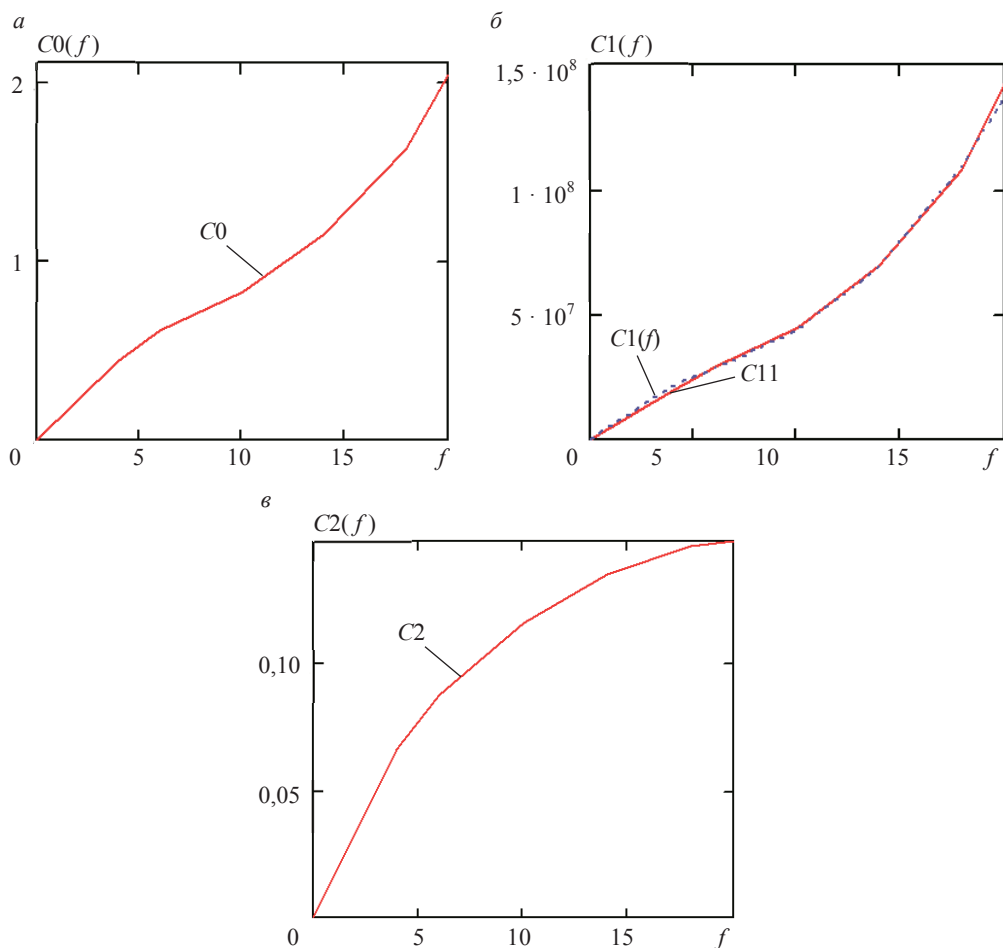


Рисунок 2. Зависимость $C0 = C0(f) - a$; зависимость $C1(f) = [0,001(f)3,04 + 1,04 f^{1,05}] \cdot 10^7$, $C1 = C11(f) - b$; зависимость $C2 = C2(f) - e$: $C0$ – поверхностная энергия разрушения; $C1, C2$ – математические константы
 Figure 2. Dependence $C0 = C0(f) - a$; $C1(f) = [0,001(f)3,04 + 1,04 f^{1,05}] \cdot 10^7$, dependence $C1 = C11(f) - b$; dependence $C2 = C2(f) - e$: $C0$ is the fracture surface energy; $C1$ and $C2$ are mathematical constants

Скорость бурения v , м/с:

$$v = n\aleph \left(\frac{k_1 F_{oc}}{\sigma_{md} \xi_1} \right)^{2/3}, \tag{5}$$

где \aleph – показатель режима разрушения забоя зубцом долота, при условии $1,4 \leq \aleph \leq 1,8$ режим бурения рациональный, которому соответствует объемное разрушение забоя скважины.

Энергоемкость бурения $E_{бр}$, мДж/м³:

$$E_{бр} = \frac{8nk_e \sigma_{md} \xi_2}{vd_{ск}^2} \left(\frac{k_1 F_{oc}}{\sigma_{md} \xi_1} \right)^{4/3} = 8M_{бр} \frac{n}{vd_{ск}^2}. \tag{6}$$

Средний диаметр осколка $d_{\text{бм}}$, м:

$$d_{\text{бм}} = k_d \sqrt[3]{\left(\frac{k_1 F_{\text{ос}}}{\sigma_{\text{мд}} \xi_1} \right)^{2/3}} = k_d \frac{v}{n} \tag{7}$$

Энергоемкость взрывания $E_{\text{вз}}$, мДж/м³:

$$E_{\text{вз}} = \frac{E_{\text{ор}} d_{\text{бм}}}{d_{\text{ср}}} \tag{8}$$

Удельный расход ВВ q , кг/м³:

$$q = \frac{E_{\text{вз}}}{e_{\text{ВВ}}} \tag{9}$$

где $e_{\text{ВВ}}$ – удельная теплота взрыва, Дж/кг.

Компьютерное моделирование параметров БВР по экспериментальным скважинам. Демонстрация адекватности модели БВР на данных карьера Кумтор. Постановка задачи и алгоритмическое описание ее решения.

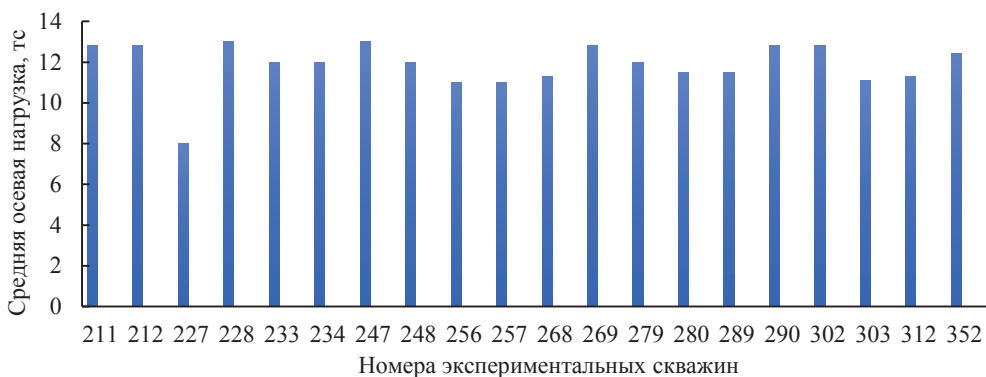


Рисунок 3. Усредненные значения осевого усилия по скважинам, тс
Figure 3. Average values of axial force for wells, tf

Во-первых, по исходным значениям усредненных по скважинам данных телеметрии бурения, размерам среднего осколка бурового шлама (рис. 3–4), и функциональным константам $C1(f)$, и $C2(f)$ рассчитать выходные параметры БВР экспериментального массива скважин (рис. 1): крепость породы; энергоемкость бурения; ожидаемый размер среднего куска породы в развале.

Во-вторых, оценить точность рассчитанных значений выходных параметров: по модели Кузнецова–Раммлера; по аналоговым данным [9]; по данным визуальной съемки.

Дополнительные исходные данные для моделирования.

Согласно геологическим данным карьера Кумтор, крепость породы блока 3650-34 лежит в диапазоне 4–9 по шкале М. М. Протодьяконова. Фактический удельный расход по экспериментальным скважинам: Эмульсолит А-20 – 0,51–0,55 кг/м³, Игданит – 0,66 кг/м³. Интервал межскважинного и междурядного замедления составил 66 мс и 97 мс. Согласно визуальной оценке качества дробления

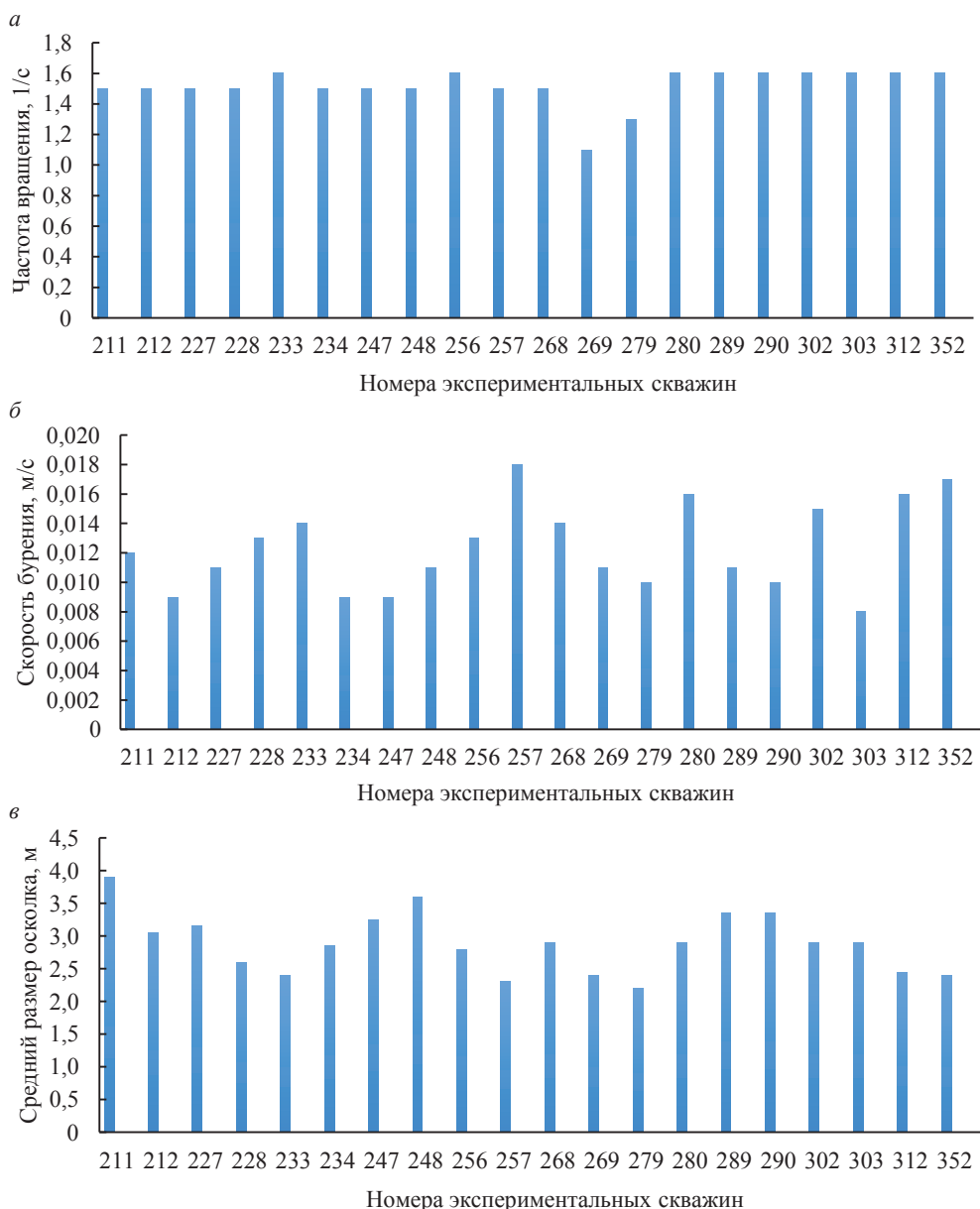


Рисунок 4. Средняя частота вращения долота по скважинам, с^{-1} – а; средняя по скважинам скорость бурения, м/с – б; средний размер осколка бурового шлама по скважинам, мм – в
 Figure 4. Average bit rotation speed for wells, s^{-1} – а; average for wells; drilling speed, m/s – б; average size of bit cuttings by well, mm – в

породы в экспериментальной зоне развала, размер кусков лежит в диапазоне 0,07–0,30 м. Геометрические параметры шарошек долота III ТЗ-ПГВ-200, согласно [7]: $\xi_1 = 2,5$, $\xi_2 = 0,25$. Коэффициенты функциональной константы С2: $\zeta_1 = 1,122$, $\zeta_2 = 0,678$. Плотность филлитов черных: $\rho = 2,8 \text{ т/м}^3$.

Расчетная модель. Для решения поставленной задачи расчетная модель описывается следующим алгоритмическим порядком.

По известным $F_{\text{oc}}^{\zeta_1}$ и отношению n/v рассчитывается значение С2, из решения уравнения: $F_{\text{oc}}^{\zeta_1} (n/v)^{\zeta_2} - C2(f) = 0$ определяем значение крепости породы.

Таблица 1. Сравнительный анализ параметров буровзрывных работ: экспериментальных, расчетных и аналоговых
 Table 1. Comparative analysis of drilling and blasting parameters: experimental, calculated and analogue

Скважина	Исходные данные				Экспериментальные расчетные параметры				Аналоговый интервал изменения среднего куска в развале, мм	Экспериментальные отклонения, %
	Осевая нагрузка $F_{ос}$, тс	Частота вращения n , с ⁻¹	Скорость бурения v , м/с	Средний осколок $d_{ос}$, мм	Крепость породы f	Энергоемкость бурения $E_{бр}$, мДж/м ³	Средний кусок $d_{ср}$, мм*			
211	12,8	1,5	0,012	3,90	5,3	113	194	160–210	4,9	
212	12,8	1,5	0,009	3,05	7,7	155	232	210–250	0,9	
227	8,0	1,5	0,011	3,15	3,0	107	167	150–200	4,6	
228	13,0	1,5	0,013	2,60	5,0	147	190	160–210	2,7	
233	12,0	1,6	0,014	2,40	4,3	153	182	150–200	4,0	
234	12,0	1,5	0,009	2,85	6,7	151	214	210–250	7,0	
247	13,0	1,5	0,009	3,25	8,3	154	213	210–250	7,4	
248	12,0	1,5	0,011	3,60	5,3	108	169	160–210	8,6	
256	11,0	1,6	0,013	2,80	4,0	128	156	150–200	10,9	
257	11,0	1,5	0,018	2,30	3,0	130	146	150–200	16,6	
268	11,3	1,5	0,014	2,80	3,8	127	154	150–200	12,0	
269	12,8	1,1	0,011	2,40	4,7	156	162	150–200	7,4	
279	12,0	1,3	0,010	2,20	5,0	174	166	160–210	10,3	
280	11,5	1,6	0,016	2,90	3,7	126	153	150–200	12,6	
289	11,5	1,6	0,011	3,35	5,0	116	166	160–210	10,3	
290	12,8	1,6	0,010	3,35	7,0	134	191	210–250	17,0	
302	12,8	1,6	0,015	2,90	4,7	129	162	160–210	12,4	
303	11,1	1,6	0,008	2,90	7,3	157	197	210–250	14,3	
312	11,3	1,6	0,016	2,45	3,7	144	153	150–200	12,6	
352	12,4	1,6	0,017	2,40	4,0	150	156	150–200	10,9	

* Среднее значение $d_{ср}$ в экспериментальной зоне составляет 176 мм.

Из выражения $C1(f) = (0,001f^{3,04} + 1,04f^{0,5})$, при известном f рассчитываем значение $C1$. По известным значениям $f, n, v, d_{\text{ом}}$ рассчитывается значение фракционной настроечной функции k_d : $k_d = d_{\text{ом}}(n/v)$. По известным $C1, F_{\text{ос}}, k_d$ рассчитывается значение энергетической настроечной функции k_e : $k_e = C1 / F_{\text{ос}}^{4/3} k_d$. По известному значению f рассчитывается значение разрушающего мелкодисперсного напряжения $\sigma_{\text{мд}}$:

$$\sigma_{\text{мд}}(f) = \begin{cases} 1,3 \cdot 10^9 [1 + 0,079(f - 15) + 0,0019(f - 15)^2], & \text{если } 6 \leq f \leq 20, \\ 9,6 \cdot 10^7 \cdot f, & \text{если } 0 < f < 3. \end{cases}$$

Рассчитывается величина энергоёмкости бурения:

$$E_{\text{бр}} = \frac{8N\sigma_{\text{мд}}\xi_2}{d_{\text{ск}}} \left(\frac{F_{\text{ос}}}{\sigma_{\text{мд}}\xi_1} \right)^{4/3}.$$

По известным значениям $E_{\text{бр}}, q, e_{\text{вв}}, d_{\text{ом}}$ на основании равенства (1) рассчитываем значение ожидаемого размера среднего куска породы в развале $d_{\text{ср}}$: $d_{\text{ср}} = (E_{\text{бр}}/qe_{\text{вв}})d_{\text{ом}}$.

Проверка адекватности фракционно-энергетической модели:

– по модифицированной модели Кузнецова–Рамmlера [10–13] для рассчитанных $d_{\text{ср}}$ определяем среднее значение $d_{\text{отд}}$ на экспериментальном массиве: $d_{\text{ср}} = (0,15(\rho_{\text{п}} f d_3)0,33d_{\text{отд}}) / q\Xi_{\text{вв}}$, где $\rho_{\text{п}}$ – плотность породы; d_3 – диаметр заряда; $d_{\text{отд}}$ – размер отдельности в массиве; $\Xi_{\text{вв}} = 1,17$ – поправочный коэффициент на эталонное ВВ Граммонит 79/21;

– рассчитываем прогнозные значения среднего куска разрушенной породы $d_{\text{ср}}^{(\text{кр})}$ по модели Кузнецова–Рамmlера, при среднем значении размера отдельности $\bar{d}_{\text{отд}}$ в экспериментальном массиве;

– определяем относительные отклонения $\delta_d^{(\text{э})}$ и $\delta_d^{(\text{кр})}$ расчетных значений экспериментального среднего куска породы $d_{\text{ср}}^{(\text{э})}$ и $d_{\text{ср}}^{(\text{кр})}$ от аналоговых [9];

– оцениваем средние значения модельных отклонений.

Результаты моделирования. Расчетные параметры БВР. Результаты моделирования параметров БВР для экспериментального массива отображены в табл. 1, 2 и на рис. 5. Визуальный анализ показывает, что размер среднего куска развала в забое и в кузове самосвала менее 30 см (рис. 6).

Анализ расчетных данных.

Расчетная крепость породы экспериментального массива соответствует геологической классификации по бурению-взрыванию [10] и находится в фактическом диапазоне ее изменения $3 < f < 8,5$.

Расчетный размер среднего куска в развале лежит в аналоговом и фактическом диапазонах его изменения в зависимости от крепости породы: $146 < d_{\text{ср}}^{(\text{э})} < 232$; $150 < d_{\text{ср}}^{(\text{а})} < 250$; $70 < d_{\text{ср}}^{(\text{ф})} < 300$.

Согласно ожидаемому среднему по скважинам размеру куска породы в развале (рис. 5, в), отклонение $\delta_d^{(\text{э})}$ экспериментального среднего куска породы $d_{\text{ср}}^{(\text{э})}$ относительно рассчитанного по модели Кузнецова–Рамmlера $d_{\text{ср}}^{(\text{кр})}$ лежит в диапазоне 2,5–13 %.

Расчитанный размер отдельности в массиве по модели Кузнецова–Рамmlера для крепости породы экспериментального массива и среднего куска в развале, относится к I–III категории трещиноватости и лежит в диапазоне 0,5–1,0 м. Средний размер отдельности – $d_{\text{отд}} = 0,598$ м.

Обсуждение результатов. Результаты моделирования.

По результатам выполненных расчетов установлено следующее:

– модель достаточно точно отображает исходные параметры бурения в аналоговую и фактическую области изменения крепости породы, энергоемкости бурения и среднего куска в развале;

– расчетные размеры среднего куска в развале хорошо согласуются с таковыми модели Кузнецова–Раммлера, которая алгоритмически не зависит от изложенной модели;

Таблица 2. Анализ размера отдельности экспериментального массива
Table 2. Analysis of the experimental array joint size

Скважина	Экспериментальные параметры		Аналоговый размер отдельности $d_{\text{отд}}^{(a)}$, м	Размер отдельности по модели Кузнецова–Раммлера $d_{\text{отд}}$, м*	Средний кусок по модели Кузнецова–Раммлера ($d_{\text{отд}} = 0,598$), мм
	Крепость породы f	Средний кусок в развале $d_{\text{ср}}$, мм			
211	5,3	194	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,550	210
212	7,7	232	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,582	238
227	3,0	167	$d_{\text{отд}} < 0,5$	0,574	174
228	5,0	190	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,551	206
233	4,3	182	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,555	196
234	6,7	214	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,563	227
247	8,3	213	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,649	229
248	5,3	169	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,598	198
256	4,0	156	$d_{\text{отд}} < 0,5$	0,607	180
257	3,0	146	$d_{\text{отд}} < 0,5$	0,625	163
268	3,8	154	$d_{\text{отд}} < 0,5$	0,609	177
269	4,7	162	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,597	190
279	5,0	166	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,599	194
280	3,7	153	$d_{\text{отд}} < 0,5$	0,611	175
289	5,0	166	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,599	194
290	7,0	191	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,642	217
302	4,7	162	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,597	190
303	7,3	197	$0,5 < d_{\text{отд}} < 1$	0,627	220
312	3,7	153	$d_{\text{отд}} < 0,5$	0,611	175
352	4,0	156	$d_{\text{отд}} < 0,5$	0,607	180

* Средний размер отдельности $d_{\text{отд}}$ составляет 0,598 м.

– рассчитанный для средних размеров куска в развале (табл. 1) по модели Кузнецова–Раммлера средний размер отдельности экспериментального массива (табл. 2) полностью соответствует I–III категории трещиноватости [9, 13, 14].

Таким образом, можно утверждать, что фракционно-энергетическая модель БВР, представленная соотношениями (2)–(9), адекватно определяет расчетные параметры бурения-взрывания по данным бортовой телеметрии бурения.

Из анализа данных (табл. 1) следует вывод, что режим бурения по скважинам имеет завышение по осевой нагрузке, при средних значениях частоты вращения долота и директивно заданной скорости бурения. Этот вывод следует из того,

что показатель рациональности бурения по скважинам находится в диапазоне $2,0 < \aleph \leq 2,8$. Поэтому, для сохранения темпов бурения и снижения затрат необходимо: применить долота с меньшими значениями параметров геометрии шарошек ξ_1, ξ_2 ; снизить осевую нагрузку и повысить частоту вращения долота.

Модель (2)–(9) позволяет решать задачи БВР в различных постановках. В настоящей работе изложена задача демонстрации адекватности модели, однако с помощью ее аналитического аппарата возможно решение иных задач, например:

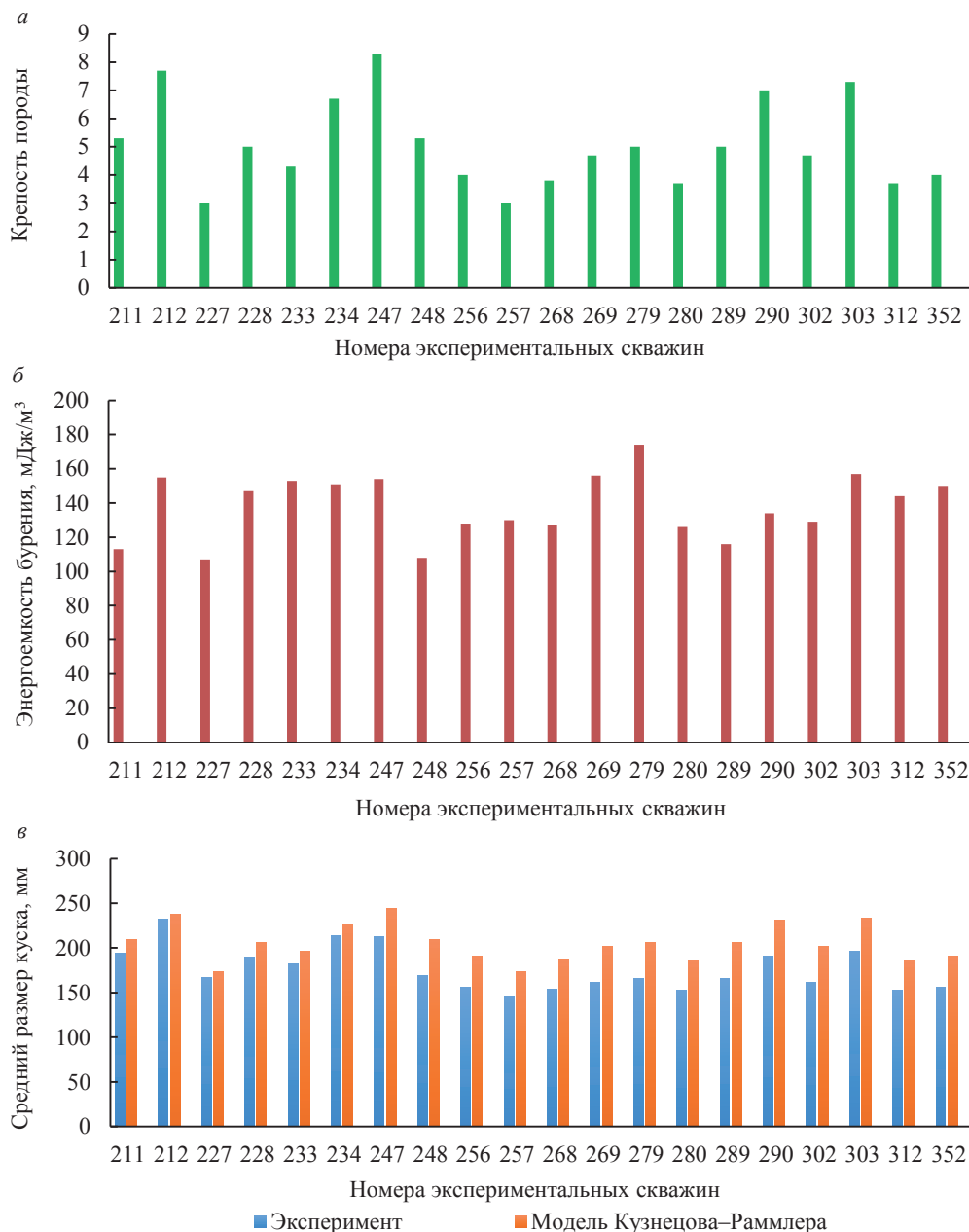


Рисунок 5. Расчетная крепость породы по шкале М. М. Протодяконова – а; энергоемкость бурения, мДж/м³ – б; ожидаемый средний по скважинам размер куска породы в развале – в
 Figure 5. Calculated rock strength according to the M. M. Protodyakonov's scale – a; energy intensity of drilling, mJ/m³ – б; expected average size of a broken lump for wells – в

- начальная настройка модели на конкретные физико-механические условия горной среды карьера;
- прямая задача расчета изменяющихся в зависимости от глубины скважины значений параметров бурения и взрывания, от входных данных к выходным (исходные данные: вращательный момент $M_{вр}$, осевая нагрузка $F_{ос}$, частота вращения n , скорость бурения v , конструктивные параметры долота, зависимости функциональных констант бурения и настроечной функции k_e ; результат расчета: крепость породы, средний осколок бурового шлама, энергоемкость бурения-взрывания, показатель рациональности режима бурения);



Рисунок 6. Визуальная оценка среднего куска породы
Figure 6. Visual estimation of an average lump of rock

- обратные задачи ретроспективного анализа, от выходных данных к входным (исходные данные: размер среднего куска в развале, энергоемкость взрывания, осевая нагрузка, функциональные константы; результат расчета: крепость породы, параметры режима бурения);
- вариационная задача проектирования параметров БВР планируемых работ (исходные данные: крепость породы, размер среднего куска в развале, необходимая физическая скорость проходки, осевая нагрузка, функциональные константы; результат расчета плановых значений: энергоемкость взрывания, частота вращения долота, энергоемкость бурения, момент вращения долота, подбор типа долота);
- текущая рационализация режима бурения (исходные данные: значения параметров бурения предыдущего интервала проходки, функциональные константы, настроечные функции; результат расчета: рациональные параметры режима бурения).

Отличия фракционно-энергетического метода от существующих. Изложенный метод, на примере демонстрации его адекватности, принципиально отличается от распространенных в настоящее время нейронных и энергетических подходов к расчету основных параметров БВР [2, 3], [11, 15], [16].

Наш метод описывает в явном математическом виде физические взаимоотношения всех актуальных переменных физических процессов бурения-взрывания, что позволяет решать множество производственных задач управления их выходными параметрами.

В приведенных далее ссылках описываются нейронные и энергетические подходы в решении отдельных задач БВР. В публикациях [2, 3], [11, 12], [15] приводятся многослойные сетевые модели для прогнозирования фрагментации взорванной породы. В них физические соотношения параметров БВР заменяются многосвязной, сетевой конструкцией специальных функций активации нейронов от произведений входных параметров и весовых коэффициентов. Данные модели через нейронную сеть отображают выбранный набор актуальных технологических параметров, например: масса заряда на метр скважины, диаметр скважин, параметры сетки скважин, крепость породы, длина заряжения скважины, удельный расход ВВ, прогнозные значения актуальных выходных параметров (размер среднего куска породы в развале). Построенные таким образом модели решают только ту задачу, которой они обучены.

В работах [16–19] приводятся модели для расчета энергоемкости бурения и крепости породы. Энергоемкость описывается моделью R. Teale [16] и И. А. Тангаева, а крепость породы эмпирической экспоненциальной зависимостью от энергоемкости. Недостаток этого подхода заключается в неадекватном отображении крепости породы, так как она неоднозначно зависит от энергоемкости. Порода с одной и той же крепостью может буриться с разной энергоемкостью при различном сочетании осевой нагрузки, частоты вращения долота, геометрических параметров шарошек и остаточного ресурса долота. Погрешность расчета крепости породы может достигать 20 %, тогда, при крепости 10–20 по шкале М. М. Протодьяконова, отклонение Δf расчетного значения от фактического может составить $\Delta f = \pm (2-4)$, а это негативно отразится на качестве взрыва.

Выводы. Фракционно-энергетическая модель, на примере 20 скважин блока 3650-34 карьера Кумтор, по данным бортовой телеметрии, адекватно рассчитывает основные параметры БВР: крепость породы по шкале Протодьяконова, удельный расход ВВ, и размер среднего куска породы в развале.

Точность расчета среднего размера куска породы d_{cp} , по экспериментальной зоне, лежит в пределах 12–30 % по отношению к фактическим и аналоговым данным.

Метод позволяет получать по каждой скважине прочностную и энергетическую информацию для конструирования заряда с целью получения заданного фракционного состава взорванной породы.

Метод позволил установить факт избыточности осевого усилия для пород с крепостью $f = 4-7$ при рациональной частоте вращения долота, что завышает удельные затраты бурения.

Основной особенностью метода является комплексность, что требует построения настроечных функций и констант бурения по результатам нескольких натуральных экспериментов. Недостатком метода является необходимость выполнения работ по гранулометрии бурового шлама и взорванной породы с привязкой к скважинам, однако эта задача для карьера решается один раз при адаптации модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевкунов А. Г., Корницкий А. И., Башкиров А. П., Айдракулов Т. Н. Месторождение золота Кумтор (Срединный Тянь-Шань, Кыргызстан) и применение трехмерного моделирования в программе Leapfrog Geo (Seequent) при проведении геологоразведочных работ // Руды и металлы. 2023. № 2. С. 18–43 DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10007
2. Sayadi A., Monjezi M., Talebi N., Khandelwal M. A comparative study on the application of various artificial neural networks to simultaneous prediction of rock fragmentation and backbreak simultaneous prediction of rock fragmentation and backbreak // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. No. 5(4). P. 318–324. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.05.007
3. Esmaili M., Salimi A., Drebenstedt C., Abbaszadeh M. Application of PCA, SVR, and ANFIS for modeling of rock fragmentation // Arabian Journal of Geosciences. 2014. DOI: 10.1007/s12517-014-1677-3
4. Кирпичев М. В. Теория подобия. М.: АН СССР, 1953. 94 с.

5. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
6. Крамаренко Н. В. Методы подобия в механике. Анализ размерностей. Новосибирск: НГТУ, 2020. 212 с.
7. Крюков Г. М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Т. 1. М.: Горная книга, 2006. 330 с.
8. Перетолчин В. А. Вращательное и шарошечное бурение скважин на карьерах. М.: Недра, 1983. 178 с.
9. Азанов М. А. Результаты определения свойств пироксенитов Качканарского рудного месторождения. Екатеринбург: УГТУ, 2016. 10 с.
10. 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
11. Gadikor J. Optimization of drilling and blasting practices at a western us open pit copper mine. Graduate Theses & Non-Theses. 2018. 168 p. URL: https://digitalcommons.mtech.edu/grad_rsch/168 (дата обращения: 4.04.2024)
12. Jethro M. A. Rock fragmentation prediction using Kuz-Ram model // Journal of Environment and Earth Science. 2016. Vol. 6. No. 5. URL: https://www.academia.edu/35203307/Rock_Fragmentation_Prediction_using_Kuz_Ram_Model (дата обращения: 4.04.2024)
13. Додис Я. М., Нифадьев В. И. Разрушение горных пород при бурении и взрывании. Бишкек: КРСУ, 2006. 374 с.
14. Vokhmin S., Trebush Yu., Kurchin G., Kirsanov A. Improving rock classification in terms of explosivity // Mining of Mineral Deposits. 2019. No. 13(3). P. 12–21. DOI: 10.33271/mining13.03.012
15. Mupeta Chisenga. Optimisation of drilling and blasting in Chimiwungo open pit at Lumwana mine. The University of Zambia, 2017. 66 p.
16. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics. 1965. Vol. 2. P. 57–73.
17. Григорьев В. В., Макаров С. Ж., Батырханов Н. Б., Райымкулов М. А., Абдакимов З. Т. Опыт внедрения программно-технического комплекса Blast Maker для условий предприятия «Богатырь Комир» // Журнал Глобус: геология и бизнес. 2023. № 3(77). С. 22–25.
18. Виноградов Ю. И., Хохлов С. В., Зигангиров Р. Р., Мифтахов А. А., Суворов Ю. И. Оптимизация удельных энергозатрат на взрывное дробление горных пород на месторождениях со сложным геологическим строением // Записки Горного Института. 2024. № 266. С. 231–245.
19. Киселев А. О. Современные способы и средства определения буримости и взрываемости горных пород // Передовые технологии на карьерах: сб. докл. 2006. С. 11–15. URL: <https://blastmaker.kg/wp-content/uploads/2020/01/sbornik-2006.pdf>.

Поступила в редакцию 5 апреля 2024 года

Сведения об авторе:

Александров Виктор Германович – кандидат сельскохозяйственных наук. E-mail: vigal47@rambler.ru; <https://orcid.org/0009-0005-1957-6223>

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-97-112

Experimental test of fractional-energy approach adequacy for the parameters of drilling and blasting according to the telemetric data

Viktor G. Aleksandrov¹

¹ Bishkek, Kyrgyzstan.

Abstract

Introduction. The main task of blasting parameters control is to determine the charge mass that ensures a specified quality of rock fragmentation for each well. According to the advanced concepts of the energy theory of drilling and blasting, it is therefore necessary to know the strength of rock and energy intensity of drilling along the depth of the well. This research presents a fractional-energy model that connects all the current parameters of drilling and blasting. Based on the input data of drilling telemetry, the model calculates the output parameters of drilling and blasting.

Research objective is to show the adequacy of the fractional-energy approach.

Methods of research. The following points are the basis for the methods of research: physical relationship between the drilling parameters, rock strength and geometry of roller cone bits; patterns of physical similarity of fractional and energy parameters of rock breaking by drilling and blasting; drilling constants derived from the first and second points.

Research results. Drilling and blasting parameters were calculated using telemetry data from drilling an experimental array of wells in the Kumtor gold mine. The comparative analysis had been made; the calculated drilling and blasting parameters were compared to the analogue, actual and calculated according to the Kuznetsov–Rammler model parameters.

Conclusions. The fractional-energy approach adequately determines the calculated drilling and blasting parameters based on on-board telemetry data for drilling.

Keywords: physical similarity; energy intensity; average lump; bit cuttings; drilling and blasting parameters; similarity constants; functional drilling constants.

REFERENCES

1. Shevkunov A. G., Kornitskii A. I., Bashkirov A. P., Aidrakulov T. N. The Kumtor gold deposit in the Middle Tien Shan, Kyrgyzstan, and the application of 3-D modeling in Seequent's Leapfrog Geo software for the geological exploration. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2023; 2: 18–43. (In Russ.) Available from: doi: 10.47765/0869-5997-2023-10007
2. Sayadi A., Monjezi M., Talebi N., Khandelwal M. A comparative study on the application of various artificial neural networks to simultaneous prediction of rock fragmentation and backbreak simultaneous prediction of rock fragmentation and backbreak. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013; 5(4): 318–324. Available from: doi: 10.1016/j.jrmge.2013.05.007
3. Esmaili M., Salimi A., Drebenstedt C., Abbaszadeh M. Application of PCA, SVR, and ANFIS for modeling of rock fragmentation. *Arabian Journal of Geosciences*. 2014. Available from: doi: 10.1007/s12517-014-1677-3
4. Kirpichev M. V. *Law of similarity*. Moscow: AS USSR Publishing; 1953. (In Russ.)
5. Gukhman A. A. *Introduction into the law of similarity*. Moscow: Vysshiaia shkola Publishing; 1973. (In Russ.)
6. Kramarenko N. V. *Methods of similarity in mechanics. Dimensional analysis*. Novosibirsk: NSTU Publishing; 2020. (In Russ.)
7. Kriukov G. M. *Physics of rock breaking when drilling and blasting*. Vol. 1. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2006. (In Russ.)
8. Peretolchin V. A. *Rotary and roller-bit drilling of wells at open pits*. Moscow: Nedra Publishing; 1983. (In Russ.)
9. Azanov M. A. *Pyroxenite properties data at the Kachkanar ore deposit*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2016. (In Russ.)
10. 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 = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 1: 14–24. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2020-1-14-24
11. Gadikor J. Optimization of drilling and blasting practices at a western us open pit copper mine. *Graduate Theses & Non-Theses*. 2018. Available from: https://digitalcommons.mtech.edu/grad_rschn/168 [Accessed 4 April 2024]
12. Jethro M. A. Rock fragmentation prediction using Kuz-Ram model. *Journal of Environment and Earth Science*. 2016; 6(5). Available from: https://www.academia.edu/35203307/Rock_Fragmentation_Prediction_using_Kuz_Ram_Model [Accessed 4 April 2024]
13. Dodis Ia. M., Nifadiev V. I. *Rock breaking when drilling and blasting*. Bishkek: KRSU Publishing; 2006. (In Russ.)
14. Vokhmin S., Trebush Yu., Kurchin G., Kirsanov A. Improving rock classification in terms of explosivity. *Mining of Mineral Deposits*. 2019; 13(3): 12–21. Available from: doi: 10.33271/mining13.03.012
15. Mupeta Chisenga. *Optimisation of drilling and blasting in Chimiwungo open pit at Lumwana mine*. The University of Zambia: 2017.
16. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*. 1965; 2: 57–73.
17. Grigoriev V. V., Makarov S. Zh., Batyrkhanov N. B., Raiymkulov M. A., Abdakimov Z. T. The practice of introducing the Blast Maker software and hardware complex for the conditions of Bogatyr Komir company. *Zhurnal Globus: geologiya i biznes = Globe: geology and Business*. 2023; 3(77): 22–25. (In Russ.)

18. Vinogradov Iu. I., Khokhlov S. V., Zigangirov R. R., Miftakhov A. A., Suvorov Iu. I. Optimization of specific energy consumption for rock crushing by explosion at deposits with complex geological structure. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 266; 2024: 231–245. (In Russ.)

19. Kiselev A. O. Advanced methods of determining drillability and blastability of rocks. In: *Advanced technologies at open pits: Proceedings*. 2006. p. 11–15. Available from: <https://blastmaker.kg/wp-content/uploads/2020/01/sbornik-2006.pdf> (In Russ.)

Received 5 April 2024

Information about the author:

Viktor G. Aleksandrov – PhD (Agricultural science). E-mail: vigal47@rambler.ru; <https://orcid.org/0009-0005-1957-6223>

Для цитирования: Александров В. Г. Экспериментальная проверка адекватности фракционно-энергетического подхода к расчету параметров буровзрывных работ по телеметрическим данным // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 4. С. 97–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-97-112

For citation: Aleksandrov V. G. Experimental test of fractional-energy approach adequacy for the parameters of drilling and blasting according to the telemetric data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 4: 97–112 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-97-112