

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ФРАКЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В.Г. Александров<sup>1</sup>, Д.Н. Сиземов<sup>2</sup>, И.О. Темкин<sup>3</sup>, А.Л. Иванников<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек, Кыргызстан

<sup>2</sup> ООО «Вист Майнинг Технолоджи», Москва, Россия

<sup>3</sup> НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: ivannickov@bk.ru

**Аннотация:** Рассмотрена актуальная для горных предприятий проблеме энергоэффективности производства. Проанализированы виды работ, на которые приходится наибольшие энергозатраты. В частности, подробно рассмотрены технологические процессы бурения и взрывания горной породы, а также основные подходы к расчету параметров бурения. Показаны преимущества и недостатки существующих моделей. Предложена новая фракционно-энергетическая численная модель, позволяющая решать как оперативно-расчетные, так и прогнозные задачи. Подробно изложены теоретические основы фракционно-энергетической модели буровзрывных работ. Описывается разработанный метод расчета, основанный на физических закономерностях подобия параметров буровзрывных работ, позволяющий в рамках единого теоретического подхода рассчитывать по текущим значениям входных параметров бурения выходные параметры буровзрывных работ. Представлен алгоритм текущего управления параметрами бурения. Результаты вычислительных экспериментов представлены в виде таблиц. Приведен анализ расчетных рациональных параметров режимов бурения. Показано, что рационализация параметров режима бурения позволяет снизить осевую нагрузку и энергоемкость бурения, а также увеличить размер среднего осколка бурового шлама. Установлено, что снижение осевой нагрузки и энергоемкости бурения пропорционально повышает стойкость долот, что снижает затраты на бурение.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, математическое моделирование, оптимизация, буровзрывные работы, удельные затраты, энергоемкость, мелкодисперсное дробление, крепость породы.

**Для цитирования:** Александров В. Г., Сиземов Д. Н., Темкин И. О., Иванников А. Л. Повышение энергоэффективности работы горных предприятий с помощью применения при расчетах фракционно-энергетических моделей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12. – С. 118–134. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_12\_0\_118.

### Enhancement of energy efficiency of mines using fractional energy models in calculations

V.G. Aleksandrov<sup>1</sup>, D.N. Sizemov<sup>2</sup>, I.O. Temkin<sup>3</sup>, A.L. Ivannikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan

<sup>2</sup> Vist Mining Technology LLC, Moscow, Russia

<sup>3</sup> NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: ivannickov@bk.ru

---

**Abstract:** The article addresses a relevant problem connected with enhancement of energy efficiency of production in the mining industry. The types of the most energy-consuming works are reviewed. In particular, the process activity involved in drilling and blasting, as well as the approaches to blasting design are analyzed. Advantages and disadvantages of the existing models are demonstrated. A new fractional energy digital model is proposed. It enables both on-line computation and prediction. The article gives details of the theory of the fractional energy modeling in drilling and blasting. The proposed calculation method uses the physical laws of similarity of drilling and blasting parameters, which allows calculation of output blast parameters using the current values of input parameters within a framework of the unified theoretical approach. The algorithm of the current blast design control is presented. The computational test data are given in the form of tables. The rational drilling design is analyzed. The article shows that efficiency promotion in drilling design process enables reduced axial loading and energy input in drilling, as well as a larger size of drill cuttings. It is found that the decrease in the axial loading and energy input in drilling proportionally increases durability of drill bits, which lowers the cost of drilling.

**Key words:** energy efficiency, mathematical modeling, optimization, drilling and blasting, specific cost, energy input, finely dispersed fragmentation, rock hardness.

**For citation:** Aleksandrov V. G., Sizemov D. N., Temkin I. O., Ivannikov A. L. Enhancement of energy efficiency of mines using fractional energy models in calculations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12):118-134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_12\_0\_118.

---

## Введение

На сегодняшний день устойчивое развитие горного предприятия предполагает комплексный подход к развитию производства [1, 2]. Большое внимание уделяется вопросам цифровой трансформации важнейшего элемента устойчивого развития российской горной промышленности. Ее осуществление предполагает комплексное решение взаимосвязанных задач, включающих повышение энергоэффективности [3–5] и безопасности (в том числе экологической [6]) реализации горно-технологических процессов. Существенную роль в решении этих задач играют современные информационные технологии, которые обеспечивают возможность рационального применения различных инструментов Индустрии 4.0 и методов искусственного интеллекта [7, 8] для построения вычислительных и прогнозных моделей [9, 10], использование которых способ-

ствует существенному повышению производительности и снижению затрат на ремонт технологического оборудования. Важнейшим этапом цифровой трансформации на пути внедрения безлюдных горных технологий является создание цифровых советчиков, позволяющих более эффективно управлять всем циклом горных работ. Для открытых горных работ значительные успехи достигнуты при реализации подобных советчиков для управления транспортно-технологическими процессами [11]. В настоящей статье представлены результаты разработки достаточно универсальных вычислительных моделей буровзрывных работ (БВР), которые также можно рассматривать как основу для создания цифрового советчика.

Как известно, в горном производстве более 60% текущих затрат приходится на основные работы: бурение-взрывание, погрузка-транспортировка, фабричная

подготовка породы [12]. Существенная доля этих затрат приходится на энергозатраты, которые определяются средним куском породы в развале и стойкостью долот.

Энергозатраты на эти работы составляют: в карьере Мурунтау — 28 мДж/м<sup>3</sup>, а для Худолозского карьера — 24 мДж/м<sup>3</sup> при размере среднего куска в развале 0,3 м. Оптимизация среднего куска позволила снизить энергопотребление до 8 и 20 мДж/м<sup>3</sup> соответственно, при среднем куске 8 и 15 см.

Из сказанного следует, что существует потребность горнодобывающих производств в моделях, связывающих исходные параметры бурения с расчетными параметрами БВР: разрушением породы бурением-взрыванием; фабричной подготовкой породы; себестоимостью карьерно-фабричных работ. При этом их теоретическая основа должна быть самодостаточной: полное множество определяющих понятий, связанных между собой системой непротиворечивых отношений.

Иными словами, модельные решения в прямом и обратном направлениях должны совпадать и не требовать привлечения дополнительных данных.

В настоящее время в практике горного производства отсутствуют подобные вычислительные инструменты. Исследованные нами модели выполняют либо прогнозную, либо оперативную, но локальную, ограниченную функцию, например, расчеты текущей энергоемкости бурения или(и) удельного расхода взрывчатых веществ (ВВ), ожидаемого размера среднего куска породы в развале. При этом эти модели чисто эмпирические, а значит, имеют ограниченную область применения.

Эти обстоятельства явились целевыми установками для нашей разработки.

Теоретической основой разработанной модели являются физические зако-

номерности разрушения породы забоя скважины и физического подобия процессов бурения-взрывания.

Исходные параметры модели — это текущие данные бортовой телеметрии: момент вращения долота, осевое усилие, частота вращения долота, скорость бурения. Расчетные параметры: крепость породы, энергоемкость бурения, средний осколок бурового шлама, удельный расход ВВ при заданном размере среднего куска развала.

Численное опробование модели на фактических данных бурения показало ее соответствие вышеизложенным положениям и адекватность расчетных параметров фактическим.

Таким образом, наша разработка доказала свою теоретическую состоятельность и практическую применимость.

### **Обзор существующих подходов к расчету параметров БВР**

#### *Классические модели*

Существует большое разнообразие моделей расчета параметров БВР, которые базируются на знании основных физико-механических параметров горного массива [13]. Совокупность этих моделей условно можно разбить на пять классов: блочнопрочностные, акустические, фрагментные, статистические, энергетические.

Блочнопрочностные модели устанавливают связь удельного расхода ВВ с трещиноватостью, прочностью, плотностью породы и заданным размером среднего куска породы в развале.

Акустические модели устанавливают связь удельного расхода ВВ и основных физико-механических характеристик горного массива с плотностью породы и скоростями распространения в нем акустических волн.

Фрагментные модели устанавливают связь класса крупности породы в развале с параметрами взрываемости по-

роды, массой заряда и объемом горной массы. Эти модели основаны на теоретических положениях Кузнецова и Рамлера.

Статистические модели, в том числе и нейронные сети, выполняют прогнозную функцию на больших массивах данных актуальных параметров БВР, рассчитывая ожидаемый размер среднего куска породы, процентное содержание различных фракций в развале. Имеются модели этого класса, оптимизирующие с определенной вероятностью управляющие параметры БВР.

Энергетические модели устанавливают связь удельного расхода ВВ с удельной энергией бурения и заданным размером среднего куска в развале.

Основной недостаток моделей первого и второго класса заключается в невозможности локального, оперативного определения значений физико-механических и структурных параметров массива горной породы в производственных условиях карьеров.

#### *Производственные аналитические модели*

В этом разделе рассмотрим модели БВР, имеющие наибольшее практическое применение в открытой разработке полезных ископаемых, где будет показана их ограниченность в управлении параметрами БВР по сравнению с двухфакторными моделями.

##### *• Карьер «Мурунтау»*

Вычисляется оптимальный (с точки зрения энергозатрат) размер среднего куска взорванной горной массы по эмпирической формуле

$$d_{\text{срopt}} = 0,08 + 0,75 \cdot 10^{-3} \sigma_{\text{сжк}} + 2 \cdot 10^{-3} W_k$$

где  $\sigma_{\text{сжк}}$  — предел прочности пород на сжатие, МПа;  $W_k$  — вместимость ковша экскаватора, м<sup>3</sup>. Рассчитывается удельный расход ВВ, соответствующий среднему куску —  $d_{\text{срopt}}$  по формуле

$$q = -(3,3 \cdot 10^3 \sigma_{\text{сжк}} \ln d_{\text{срopt}}) \cdot \frac{e_{\text{вв}}}{e_{\text{ввз}}}, \text{ кг/м}^3,$$

где  $e_{\text{вв}}$  — удельная теплота взрыва штатного ВВ, МДж/м<sup>3</sup>;  $e_{\text{ввз}}$  — удельная теплота взрыва эталонного ВВ, МДж/м<sup>3</sup>.

##### *• Тугнуйский разрез*

В работе А.Б. Исайченкова (СУЭК) приводится следующая модель БВР [14]:

$$q = 0,13 \rho f^{1/4} (0,6 + 3,3 d_z d_0) \cdot$$

$$\cdot \left( \frac{0,5}{d_k} \right)^{0,4} \frac{Q_3}{Q_{\text{вв}}},$$

где  $\rho$  — плотность пород, т/м<sup>3</sup>;  $d_0$  — средний размер отдельности в массиве, м;  $f$  — коэффициент крепости пород по М.М. Протодяконову;  $Q_3$  — удельная теплота взрыва эталонного ВВ, МДж/м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{вв}}$  — удельная теплота взрыва применяемого ВВ, МДж/м<sup>3</sup>;  $d_z$  — реальный диаметр заряда, м.

Данная модель применима для расчета удельного расхода в породах различной крепости и категорий трещиноватости на карьерах цветной и черной металлургии, для высоты уступа 15–20 м, типа ВВ граммонит 79/21, диагональной схемы короткозамедленного взрывания (КЗВ), размера кондиционного куска 500 мм и диаметра скважин 243 мм. Проведенные экспериментальные исследования показали, что эта формула справедлива в диапазоне диаметра скважин 100–400 мм и размера кондиционного куска 0,25–1,2 м.

Зависимость между минимальной энергоемкостью бурения и коэффициентом крепости интерполируется следующей степенной функцией:

$$f = 1,0665 \cdot E_{\text{бpmin}}^{0,4854}.$$

Опытным путем было установлено (В.Н. Мосинец), что существует однозначное соответствие между энергоемкостью бурения и удельной энергоемко-

стью взрывания, которое описывается выражением

$$E_{\text{вз}} = 1,176 \cdot E_{\text{брmin}}^{0,2503},$$

где  $f$  — крепость породы по М.М. Протодьяконову;  $E_{\text{вз}}$  — энергоемкость взрывания, МДж/м<sup>3</sup>;  $E_{\text{брmin}}$  — минимальная энергоемкость бурения, МДж/м<sup>3</sup>.

• *АО «Anatum»*

Модель Кузнецова–Рамллера [15, 16] является наиболее распространенной прогнозной моделью в горной практике и описывается следующим выражением:

$$d_{\text{sr}} = A(f)q^{-0,8}(W_{\text{ск}}q)^{1/6} \left( \frac{115}{RWS} \right)^{19/30},$$

где  $A(f)$  — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства массива;  $q$  — удельный расход ВВ;  $W_{\text{ск}}$  — взрывная нагрузка на скважину;  $RWS$  — относительный эквивалент ВВ по теплоте взрыва относительно ANFO; 115 — относительный эквивалент тринитротолуола.

Модифицированная модель Кузнецова–Рамллера:

$$d_{\text{cp}} = \frac{0,15(\rho_{\text{п}}fd_3)^{0,33} d_{\text{ом}}}{qe_{\text{вв}}},$$

где  $d_{\text{cp}}$  — размер среднего куска, м;  $\rho_{\text{п}}$  — плотность породы, т/м<sup>3</sup>;  $f$  — крепость породы;  $d_3$  — диаметр заряда, м;  $d_{\text{ом}}$  — диаметр отдельности в массиве, м;  $q$  — удельный расход ВВ, кг/м<sup>3</sup>;  $e_{\text{вв}}$  — эквивалент относительно эталонного ВВ.

• *Качканарский ГОК*

Для главного карьера КачГОК С.Н. Жариковым были выполнены исследования по установлению связи удельного расхода ВВ с энергоемкостью бурения. Эта зависимость описывается эмпирическим соотношением [17]

$$q = 10^{-4} E_{\text{бр}}^3 - 0,21 E_{\text{бр}}^2 + 153,6 E_{\text{бр}} - 31\,276,6.$$

Данная зависимость была установлена для следующих условий:

- ВВ — ОМ-70 с теплотой взрыва 3,35 МДж/кг;
- Буровой станок СБШ-250МН;
- Диаметр долота — 250 мм;
- Энергоемкость бурения определялась по формуле  $E_{\text{бр}} = Nt / w_{\text{пм}}$ , где  $N$  — мощность, потребляемая двигателем вращателя, кВт·ч;  $t$  — среднее время бурения 1 погонного метра, ч;  $w_{\text{пм}}$  — выход горной массы с 1 погонного метра, м<sup>3</sup>, который определяется по количеству пробуренных скважин и объему блока.

• *Модель R. Teale*

Наиболее простой и в то же время достаточно эффективный способ интерпретации результатов бурения — это вычисление энергетических показателей процесса бурения. Одним из удачных энергетических показателей является предложенная R. Teale формула расчета удельной энергии бурения для вращательного бурения [18]:

$$E_{\text{бр}} = \frac{F_{\text{oc}}}{s_{\text{ск}}} + \frac{2nM_{\text{вр}}}{s_{\text{ск}}v},$$

где  $E_{\text{бр}}$  — удельная энергия бурения, кДж/м<sup>3</sup>;  $F_{\text{oc}}$  — нагрузка на долото, кН;  $s_{\text{ск}}$  — сечение скважины, м<sup>2</sup>;  $n$  — скорость вращения долота, об/с;  $M_{\text{вр}}$  — вращающий момент долота, кН·м;  $v$  — скорость проходки, м/с

От энергоемкости бурения осуществляется переход к удельному расходу ВВ:

$$q = (0,003E_{\text{бр}} + 0,06\rho) \frac{Q_3}{Q_{\text{вв}}}, \text{ кг/м}^3,$$

где  $\rho$  — плотность породы, т/м<sup>3</sup>;  $Q_3, Q_{\text{вв}}$  — удельная теплота взрыва эталонного и штатного ВВ.

Анализ приведенных выше моделей БВР выявил их основные недостатки:

- непригодны (кроме модели R. Teale) для расчетов параметров бурения по глубине скважины;

- непригодны для решения оперативных задач управления параметрами бурения-взрывания, рационализации текущего режима бурения, оптимизации удельных затрат бурения.

Причина этих недостатков заключается в отсутствии в данных моделях аппарата фракционно-энергетических связей и отношений физического подобия параметров бурения-взрывания, на основе которых решаются основные задачи управления текущими параметрами БВР.

### Фракционно-энергетическое подобие параметров бурения-взрывания

Предлагается метод расчета, основанный на физических закономерностях подобия, параметров БВР, позволяющий в рамках единого теоретического подхода:

- рассчитывать по текущим значениям входных параметров бурения выходные параметры БВР: крепость породы, энергоемкость бурения-взрывания, диаметр среднего бурового осколка;
- рационализировать текущий режим бурения и оптимизировать его по минимуму удельных затрат.

В основу метода положены следующие теоретические положения:

- физические зависимости В.А. Перетолчина [19] для момента вращения долота, энергоемкости бурения, скорости бурения, диаметра среднего бурового осколка;
- принципы физического подобия процессов разрушения горной породы бурением и взрыванием.

#### Константы подобия

На основании теорем подобия физических процессов получены следующие константы и инварианты подобия для пород с однородными физико-механическими условиями ( $f = const$ ):

$$\frac{E_{бр}}{E_{вз}} = \frac{S_{бм}}{S_{вз}} = \frac{d_{ср}}{d_{бм}} = Q = const1, \quad (1)$$

$$\frac{E_{бр}}{S_{бм}} = 1, \quad (2)$$

откуда  $\frac{E_{бр}}{S_{бм}} = \frac{E_{вз}}{S_{вз}} = \varepsilon = const2,$

$$\frac{E_{бр} d_{бм}}{E_{вз} d_{ср}} = 1, \quad (3)$$

откуда  $E_{бр} d_{бм} = E_{вз} d_{ср} = C0 = const3.$

$E_{вз}$  — удельная энергоемкость взрывания, МДж/м<sup>3</sup>;  $S_{бм}$  — площадь полной поверхности осколков в 1 м<sup>3</sup> бурового шлама, м<sup>2</sup>;  $S_{вз}$  — площадь полной поверхности кусков в 1 м<sup>3</sup> развала породы, м<sup>2</sup>;  $d_{бм}$  — размер среднего осколка бурового шлама, м;  $d_{ср}$  — размер среднего куска породы в развале, м;  $Q, \varepsilon, C0$  — константы подобия.

#### Энергоемкость и удельный расход ВВ взрывного разрушения.

Из выражения (3) следует равенство для определения энергоемкости взрывного разрушения —  $E_{вз}$ , при заданном значении  $d_{ср}$  и известных значениях  $E_{бр}$  и  $d_{бм}$ :

$$E_{вз} = \frac{E_{бр} \cdot d_{бм}}{d_{ср}}. \quad (4)$$

Удельный расход ВВ рассчитывается по формуле

$$q = \frac{E_{вз}}{e_{вв}}, \quad (5)$$

где  $e_{вв}$  — удельная теплота взрыва, МДж/кг.

#### Модели параметров бурения

- Момент вращения долота —  $M_{вр}$ , Н·м:

$$M_{\text{вп}} = k_e \cdot \frac{\xi_2}{\sigma_{\text{мд}}^{1/3}} \cdot \left( \frac{k_1 F_{\text{ос}}}{\xi_1} \right)^{4/3}, \quad (6)$$

где

$$k_e = b_0 e^{b_1 f} f^{b_2} F_{\text{ос}}^{b_3} \left( \frac{v}{n} \right)^{b_4}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{мд}} = 1,3 \cdot 10^9 \left[ 1 + 0,079(f - 15) + 0,0019(f - 15)^2 \right] \quad (8)$$

- Скорость бурения —  $v$ , м/с:

$$v = n \cdot \aleph \cdot \left( \frac{k_1 F_{\text{ос}}}{\sigma_{\text{мд}} \xi_1} \right)^{2/3}. \quad (9)$$

- Энергоемкость бурения —  $E_{\text{вп}}$ , МДж/:

$$E_{\text{вп}} = \frac{8nk_e \sigma_{\text{мд}} \xi_2}{v_{\text{вп}} d_{\text{ск}}^2} \left( \frac{k_1 F_{\text{ос}}}{\sigma_{\text{мд}} \xi_1} \right)^{4/3} = 8M_{\text{вп}} \cdot \frac{n}{vd_{\text{ск}}^2} \quad (10)$$

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

$$d_{\text{бм}} = k_d \aleph \left( \frac{k_1 F_{\text{ос}}}{\sigma_{\text{мд}} \xi_1} \right)^{2/3} = k_d \frac{v}{n}; \quad (11)$$

$$k_d = a_0 e^{a_1 f} f^{a_2} F_{\text{ос}}^{a_3} \left( \frac{n}{v} \right)^{a_4}, \quad (12)$$

где  $k_e$ ,  $k_d$  — настроечные функции;  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  — геометрические параметры шарошек;  $k_1$  — показатель очистки забоя скважины, при хорошей очистке  $k_1 = 1$ ;  $F_{\text{ос}}$  — осевая нагрузка, МН;  $\sigma_{\text{мд}}$  — мелкодисперсное разрушающее напряжение, Па;  $n$  — частота вращения долота,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\aleph$  — показатель режима разрушения забоя;  $d$  — диаметр скважины, м.

- Дополнительные константы бурения.

Представим выражение (10) в виде

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

откуда, при условии  $f = \text{const}$ , с учетом (3) и (9), имеем:

$$E_{\text{вп}} \cdot d_{\text{бм}} = \frac{8k_e k_d \sigma_{\text{мд}} \xi_2}{d_{\text{ск}}^2} \left( \frac{k_1 F_{\text{ос}}}{\sigma_{\text{мд}} \xi_1} \right)^{4/3} = C0 \quad (13)$$

Из выражения (13) следуют выражения для дополнительных констант бурения:

$$C1 = k_e k_d F_{\text{ос}}^{4/3} = a_0 b_0 e^{(a_1+b_1)f} f^{(a_2+b_2)}.$$

$$F_{\text{ос}}^{(a_3+b_3+4/3)} \left( \frac{n}{v} \right)^{(a_4+b_4)} \quad (14)$$

$$C2 = F_{\text{ос}}^{(a_3+b_3+4/3)} \left( \frac{n}{v} \right)^{(a_4+b_4)}. \quad (15)$$

Из соотношения (9), при условии  $f = \text{const}$ , следует константа  $C3$ :

$$\frac{n_1 \aleph_1 F_{\text{ос}1}^{2/3}}{v_1} = 1, \quad \frac{n_2 \aleph_2 F_{\text{ос}2}^{2/3}}{v_2}$$

откуда

$$C3 = \frac{n_1 \aleph_1 F_{\text{ос}1}^{2/3}}{v_1} = \frac{n_2 \aleph_2 F_{\text{ос}2}^{2/3}}{v_2}. \quad (16)$$

### Алгоритм текущего управления параметрами бурения

Настоящий алгоритм может стать аналитической основой программного продукта «Советчик машиниста бурения» для бортового контроллера бурового станка. Исходными данными текущего расчета параметров бурения являются данные бортовой телеметрии: момент вращения —  $M_{\text{вп}}$ , осевая нагрузка —  $F_{\text{ос}}$ , частота вращения долота —  $n$ , скорость бурения —  $v$  и функции —  $C0 = C0(f)$ ,  $C1 = C1(f)$ ,  $C2 = C2(f)$ , которые определяются экспериментально по фактическим данным бурения-взрывания.

Теоретические зависимости констант от крепости породы —  $f$  (рис. 1 — 3), по-

строены по данным Качканарского ГОК «Шкала буримости-взрываемости пород Гусевогорского месторождения» для долота 77/8" 200,0 ТКЗ-ПГВ.632, «ГЛУБУР».

*Расчет значений текущих параметров бурения*  
Вариант 1.

Исходные данные для расчета: вращательный момент —  $M_{вр}$ , осевая нагрузка —  $F_{ос}$ , частота вращения —  $n$ , скорость бурения —  $v$ , конструктивные параметры долота, зависимости констант бурения и настроечный коэффициент —  $k_e$ .

Последовательность расчетных действий:

- Крепость породы  $f$  находится из решения уравнения

$$y(f) = \sigma_{мд} - \left[ k_e \cdot \frac{\xi_2}{M_{вр}} \cdot \left( \frac{F_{ос}}{\xi_1} \right)^{\frac{4}{3}} \right]^3 = 0. \quad (17)$$

- Энергоемкость бурения  $E_{бр}$ :

$$E_{бр} = 8 \cdot M_{вр} \cdot n / v d_{ск}^2. \quad (18)$$

- Средний размер бурового осколка —  $d_{бм}$ :

$$d_{бм} = \frac{C0(f)}{E_{бр}}. \quad (19)$$

- Фракционный настроечный коэффициент —  $k_d$ :

$$k_d = d_{бм} \cdot \frac{n}{v}. \quad (20)$$

- Показатель режима разрушения —  $\aleph$ :

$$\aleph = \frac{v}{n} \cdot \left( \frac{F_{ос}}{\sigma_{мд} \xi_1} \right)^{-2/3}. \quad (21)$$

- Энергетический настроечный коэффициент —  $k_e$ :

$$k_e = M_{вр} \cdot \left[ \frac{\xi_2}{\sigma_{мд}^{1/3}} \cdot \left( \frac{F_{ос}}{\xi_1} \right)^{4/3} \right]^{-1}. \quad (22)$$

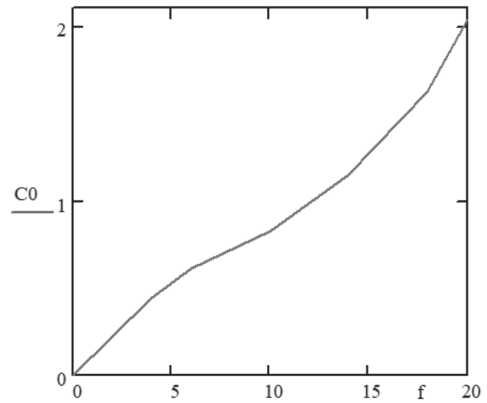


Рис. 1. Зависимость  $C0 = C0(f)$

Fig. 1. Dependence  $C0 = C0(f)$

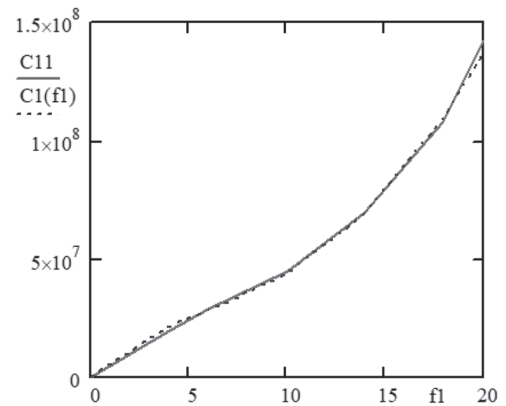


Рис. 2. Зависимость  $C1 = C1(f)$

Fig. 2. Dependence  $C1 = C1(f)$

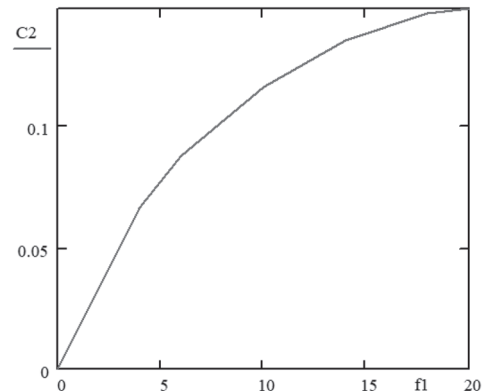


Рис. 3. Зависимость  $C2 = C2(f)$

Fig. 3. Dependence  $C2 = C2(f)$



Вариант 2.

Исходные данные для расчета: вращательный момент —  $M_{\text{вп}}$ , осевая нагрузка —  $F_{\text{ос}}$ , частота вращения —  $n$ , скорость бурения —  $v$ , диаметр среднего шламowego осколка —  $d_{\text{бм}}$ , конструктивные параметры долота, зависимости констант бурения.

Последовательность расчетных действий:

- Энергоёмкость бурения —  $E_{\text{бп}}$ :

$$E_{\text{бп}} = 8 \cdot M_{\text{вп}} \cdot n / v d_{\text{ск}}^2. \quad (23)$$

- Крепость породы  $f$  определяется из решения следующего уравнения:

$$y(f) = C0(f) - E_{\text{бп}} \cdot d_{\text{бм}} = 0. \quad (24)$$

- Фракционный настроечный коэффициент —  $k_d$ :

$$k_d = d_{\text{бм}} \cdot \frac{n}{v}. \quad (25)$$

- Энергетический настроечный коэффициент —  $k_e$ :

$$k_e = M_{\text{вп}} \cdot \left[ \frac{\xi_2}{\sigma_{\text{мд}}^{1/3}} \cdot \left( \frac{k_1 F_{\text{ос}}}{\xi_1} \right)^{4/3} \right]^{-1}. \quad (26)$$

- Показатель режима разрушения —  $\aleph$ :

$$\aleph = \frac{v}{n} \cdot \left( \frac{F_{\text{ос}}}{\sigma_{\text{мд}} \xi_1} \right)^{-2/3}. \quad (27)$$

Если показатель  $\aleph$  соответствует условию  $1,4 \leq \aleph \leq 1,8$ , то режим разрушения забоя скважины — объемный, иное требует рационализации параметров бурения —  $F_{\text{ос}}$  и  $n/v$ , при условии качественной очистки забоя от шлама.

#### Рационализация параметров бурения

Рационализация параметров бурения, с целью обеспечения объемного режима разрушения забоя скважины, заключается в решении задачи расчета значений  $F_{\text{ос}}^{\text{рат}}$  и  $(n/v)^{\text{рат}}$  средствами описанной выше модели.

Из выражений (9) и (15) следует расчетная формула для параметра  $F_{\text{ос}}^{\text{рат}}$ :

$$F_{\text{ос}}^{\text{рат}} = \left[ \aleph_{\text{рат}}^{\zeta_2} \cdot \frac{(C2)^{b_3}}{(\sigma_{\text{мд}} \xi_1)^{\frac{2(\zeta_2)}{3}}} \right]^{\frac{3}{3(\zeta_1) - 2(\zeta_2)}}, \quad (28)$$

где

$$\zeta_1 = a_3 + b_3 + 4/3,$$

$$\zeta_2 = a_4 + b_4, \{a_3, a_4\}, \{b_3, b_4\}^-$$

коэффициенты настроечных функций (7), (12),  $\aleph_{\text{рат}} = (1,4 \div 1,8)$ .

Рационализация частотно-скоростного отношения —  $n/v = N$ :

$$N^{\text{рат}} = \left[ \aleph_{\text{рат}} \cdot \left( \frac{F_{\text{ос}}^{\text{рат}}}{\sigma_{\text{мд}} \xi_1} \right)^{2/3} \right]^{-1}. \quad (29)$$

Рассчитываем значение  $k_e^{\text{рат}}$ :

$$k_e^{\text{рат}} = b_0 e^{b_1 f} f^{b_2} (F_{\text{ос}}^{\text{рат}})^{b_3} (N^{\text{рат}})^{b_4}. \quad (30)$$

Рассчитываем по формуле (10) рациональное значение энергоёмкости бурения  $E_{\text{бп}}^{\text{рат}}$ :

$$E_{\text{бп}}^{\text{рат}} = \frac{8 k_e N^{\text{рат}} \sigma_{\text{мд}} \xi_2 \left( \frac{k_1 F_{\text{ос}}^{\text{рат}}}{\sigma_{\text{мд}} \xi_1} \right)^{4/3}}{d_{\text{ск}}^2}. \quad (31)$$

Рассчитываем ожидаемый вращательный момент  $M_{\text{вп}}^{\text{рат}}$ :

$$M_{\text{вп}}^{\text{рат}} = E_{\text{бп}}^{\text{рат}} \cdot \frac{d_{\text{ск}}^2}{8 N^{\text{рат}}}. \quad (32)$$

Рациональное значение частоты вращения долота  $n^{\text{рат}}$  определяется из выражения

$$n^{\text{рат}} = N^{\text{рат}} \cdot v^{\text{рат}}, \quad (33)$$

где  $v^{\text{рат}}$  — согласно исследованиям [20], экономически рациональная скорость бурения, описывается выражением

$$v_{\text{э.о}} = v_0 \cdot \left[ 1 - \left( \sqrt{\frac{K_{\text{э}}}{\varphi} - 1} \right) / \left( \frac{K_{\text{э}}}{\varphi} - 1 \right) \right], \quad (34)$$

где

$$K_{\gamma} = \frac{A}{C_{\delta} T_c \eta}, \varphi = \frac{V_0}{L_{\delta}^{opt}},$$

$$L_{\delta}^{opt} = V_0 \cdot \left( \sqrt{\frac{\gamma \cdot L_{\delta}^*}{C_{\delta} \cdot V_0}} - 1 \right) / \left( \frac{\gamma}{C_{\delta}} - \frac{V_0}{L_{\delta}^*} \right) \quad (35)$$

$V_0$  – начальная скорость бурения, м/с;  
 $L_{\delta}^*$  – теоретическая стойкость долота, м;  
 $C_{\delta}$  – стоимость долота, руб;  $\gamma = A / (T_c \cdot \eta)$ ;  $A$  – удельная стоимость машиносмены, руб/мс;  $T_c$  – продолжительность смены, ч/мс;  $\eta$  – коэффициент использования станка.

Таблица 1

**Выборочные исходные данные телеметрии бурения блока 1260-65, Озерный ГОК, станок № 9484 18, машинист № 11**  
**Selected initial telemetry data for drilling block 1260-65, Ozerny GOK, machine No. 9484 18, operator No. 11**

Скважина №	Глубина, м	Глубина текущая, м	Давление воздуха, psi	Осевое давление, psi	Обороты, мин <sup>-1</sup>	Момент вращения, psi	Мгновенная скорость, м/мин
158	12,08	7,31	37	2978	104	1780	0,327
326	12,21	3,06	37	2935	104	2292	0,528
326	12,21	4,30	38	2966	108	1379	0,191
326	12,21	10,55	38	2945	107	1445	0,167
8	11,28	4,10	38	2878	103	1868	0,491
8	11,28	5,24	38	2892	103	1861	0,626
8	11,28	7,94	38	2888	103	1750	0,860
8	11,28	11,17	37	2918	100	2529	0,254

Таблица 2

**Значения расчетных параметров БВР**  
**Values of design parameters of drilling and blasting systems**

Расчетный параметр	Формула	Номер скважины / горизонт							
		№ 158/ 7,31	№ 326/ 3,06	№ 326/ 4,3	№ 326/ 10,55	№ 8/ 4,1	№ 8/ 5,24	№ 8/ 7,94	№ 8/ 11,17
$f$	(17)	13,2	9,4	18,7	20,8	8,8	6,7	4,0	18,2
$E_{бр}$ , мДж/м <sup>3</sup>	(18)	325	260	448	532	225	176	120	572
$d_{бм} \cdot 10^{-3}$ , м	(19)	3,17	3,08	3,99	3,95	3,4	3,72	3,65	3,12
$k_d$	(20)	1,0	0,61	2,26	2,53	0,71	0,61	0,44	1,24
$N$	(21)	1,78	2,32	1,34	1,30	2,12	2,35	2,70	1,89
$k_e$	(22)	4,86	5,70	4,37	4,84	4,68	4,33	3,49	8,08
$E_{вз}$ , мДж/м <sup>3</sup>	(4)	3,69	3,20	5,11	6,0	3,19	2,84	2,44	5,62
$q$ , кг/м <sup>3</sup>	(5)	1,05	0,91	1,60	1,71	0,91	0,81	0,70	1,61
$d_{ср}$ , м	–	0,28	0,25	0,32	0,35	0,24	0,23	0,18	0,32

Замечание. Ввиду отсутствия фактических данных по параметрам взрывания Озерного ГОК мы воспользовались данными шкалы буримости Гусевогорского железорудного месторождения Качканарского ГОК (табл. 3), который по рудному материалу и физико-механическим свойствам пород подобен исследуемому объекту.

Таблица 3  
Шкала буримости-взрываемости  
Drillability-explosivity scale

Категория		Средний диаметр отдельности, м		Акустиче- ский по- казатель трещино- ватости	Коэффи- циент крепости по Прото- дьяконову	Реальная производи- тельность СБШ-250МН м/смену	Нормирующие критерии оценки буримости-взрываемости				Формула расчета	
треши- новато- ности	буримости	взрывае- мости	в мас- сиве	в горной массе	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14
I-II	VIII IX X	легко	IV	до 0,5	0,15-0,2	2 3 4	103 93 85	0,9-1,1 1,1-1,3 1,3-1,5	1,2-1,5 1,5-1,82 1,83-2,26	1,4-1,6 1,7-2,3 2,4-2,8	0,64 0,69 0,74	
III	XI XII XIII	средне	III	0,5-1,0	0,21-0,25	6 8 10	78 69 62	1,5-1,8 1,8-2,1 2,1-2,5	2,27-2,68 2,69-3,30 3,31-3,34	2,9-3,5 3,6-4,2 4,3-5,3	0,8 0,87 0,95	$q =$ $= 0,24e +$ $+ 0,4$
IV	XIV XV XVI	трудно	II	1,0-1,5	0,26-0,30	12 14 16	55 48 43	2,5-2,9 2,9-3,5 3,5-4,2	3,35-4,82 4,83-5,62 5,63-6,78	5,4-6,2 6,3-7,7 7,8-9,0	1,05 1,17 1,32	
V	XVII XVIII XIX	весьма трудно	I	1,5	0,31-0,35	18 20 20	37 33 30	4,2-5,0 5,0-5,9 5,9-6,9	6,79-7,86 7,87-9,40 9,41-10,96	9,1-10,9 11-13 13,1-15,5	1,5 1,71 1,94	

## Результаты компьютерного модельного эксперимента

Для оценки адекватности, описанной выше модели БВР был проведен компьютерный эксперимент на исходных данных телеметрии бурения блока 1260-75 Озерного ГОК (см. табл. 1).

### Решение прямой задачи бурения

Алгоритм решения прямой задачи бурения описан в разделе «Расчет значений текущих параметров бурения». Модельный расчет на исходных данных (табл. 1) будем проводить при следующих условиях: диаметр долота —  $d_{\text{СК}} = 0,2$  м; параметры геометрии шарошек —  $\xi_1 = 2,5$ ;  $\xi_2 = 0,3$ ; настроечные коэффициенты функции —  $K_e$ :  $b_0 = 6,386 \cdot 10^{15}$ ;  $b_1 = 0,08$ ;  $b_2 = 1,065$ ;  $b_3 = -2,317$ ;  $b_4 = -1,823$ ; размер среднего куска в развале —  $d_{\text{ВЗ}} = 0,18 \div 0,35$  м, удельная теплота сгорания ВВ —  $e_{\text{ВВ}} = 3,5$  Мдж/кг.

Результаты решения прямой задачи приводятся в табл. 2.

### Результаты рационализации параметров режима разрушения забоя

Расчет рациональных параметров режима бурения выполнялся для бурового

Таблица 4

### Результаты рационализации параметров режима бурения Results of rationalization of drilling mode parameters

Расчетные параметры	Номер скважины/горизонт						
	№ 326/ 3,06	№ 326/ 4,3	№ 326/ 10,55	№ 8/ 4,1	№ 8/ 5,24	№ 8/ 7,94	№ 8/ 11,17
$f$	9,4	18,7	20,8	8,8	6,7	4,0	18,2
$\aleph$	2,32/1,8	1,34/1,4	1,30/1,4	2,12/1,7	2,35/1,7	2,35/1,8	1,89/1,8
$F_{\text{OC}} \cdot 10^{-4}$ , Па	20,5/15,9	20,8/21,8	20,6/22,2	20,2/16,1	20,2/14,6	20,2/13,4	20,4/19,4
$E_{\text{БР}}$ , МДж/м <sup>3</sup>	260/236	448/456	532/548	225/207	176/156	120/97	572/561
$n$ , с <sup>-1</sup>	104/159	108/100	107/94	103/149	103/177	103/203	100/108
$v$ , м/с	0,53/0,35	0,19/0,21	0,17/0,19	0,49/0,34	0,63/0,36	0,86/0,44	0,25/0,23
$d_{\text{БМ}} \cdot 10^{-3}$ , м	3,1/3,4	4,0/3,9	4,0/3,8	3,4/3,7	3,7/4,2	3,6/4,6	3,1/3,2

Замечание. В числителе — исходное значение, в знаменателе — рациональное.

долота 7 7/8" 200,0 ТКЗ-ПГВ.632, которое имеет максимальную эффективность при малых и средних скоростях вращения (60 — 115 об/мин) и осевой нагрузке от 90 до 170 кН.

Результаты рационализации параметров режима бурения по условию объемного разрушения забоя скважины представлены в табл. 4.

## Обсуждение

Выше были изложены теоретические основы фракционно-энергетической модели БВР и результаты численного модельного эксперимента с использованием данных табл. 3, с помощью которых выполнен следующий анализ.

### Анализ теоретической основы модели

Описанная модель является самодостаточной, т.е. обладает полнотой актуальных понятий, и внутренне не противоречива. Последнее обстоятельство означает то, что неоднократное решение в цикле прямой → обратной → прямой задач БВР дают точно совпадающие численные результаты.

Это говорит о том, что вычислительные процедуры симуляции процесса управления параметрами бурения не бу-

Таблица 5

**Отклонения расчетных параметров БВР от данных табл. 3**  
**Deviations of the calculated parameters of the BVR from the data in Table 3**

Расчетные параметры	Отклонения параметров, %							
	№ 158/ 7,31	№ 326/ 3,06	№ 326/ 4,3	№ 326/ 10,55	№ 8/ 4,1	№ 8/ 5,24	№ 8/ 7,94	№ 8/ 11,17
$E_{бр}$ , МДж/м <sup>3</sup>	325/344 6	260/240 8	448/492 9	532/607 12	225/240 6	176/183 4	120/149 19	572/493 4
$q$ , кг/м <sup>3</sup>	1,05/1,11 5,4	0,91/0,91 0	1,60/1,60 0	1,71/1,9 0,95	0,91/0,92 1,1	0,81/0,83 2,4	0,70/0,74 5,4	1,61/1,50 7,3
$d_{ср}$	0,28/0,29 4	0,25/0,23 8	0,32/0,29 10	0,35/0,31 12	0,24/0,22 7	0,23/0,21 7,5	0,17/0,15 12	0,32/0,29 9

Замечания: Числитель — расчет, знаменатель — факт (см. табл. 3, вторая строка, %).  
В строке « $d_{ср}$ » в знаменателе значение по модели Кузнецова–Раммлера.

дут «зависать», а результаты расчетов не будут расходиться.

Модель может применяться как для оперативных, так и для прогнозных решений задач БВР. Это следует из того, что оперативные задачи БВР могут решаться по текущим данным бортовой телеметрии на каждом заданном интервале проходки, а прогнозные задачи, например, проект на бурение и взрыв, можно считать с помощью модели по среднестатистическим исходным данным бурения-взрывания предыдущих буровзрывных работ.

Основное отличие нашей модели от ранее описанных — это ее способность комплексно решать в реальном масштабе времени задачи анализа и управления процессами бурения и взрывания. Расчет текущих фракционно-энергетических характеристик по глубине скважины дает расчетную базу для конструирования заряда скважины по структуре и мощности, который гарантирует заданный фракционный состав взорванной массы блока, обеспечивающий минимальные карьернозаводские затраты по каждой скважине.

Таблица 6

**Значения рациональных параметров режима бурения**  
**Values of rational drilling mode parameters**

Расчетные параметры	Номер скважины/горизонт							
	№ 326/ 3,06	№ 326/ 4,3	№ 326/ 10,55	№ 8/ 4,1	№ 8/ 5,24	№ 8/ 7,94	№ 8/ 11,17	
$f$	9,4	18,7	20,8	8,8	6,7	4,0	18,2	
$\aleph$	1,8	1,34	1,3	1,7	1,7	1,8	1,8	
$F_{ос} \cdot 10^4$ , Па	15,9/–22	20,8/0	20,6/0	16,1/–20	14,6/–28	13,4/–34	19,4/–5	
$E_{бр}$ , МДж/м <sup>3</sup>	236/–9	448/0	532/0	207/–8	156/–11	97/–19	561/–2	
$n$ , с <sup>-1</sup>	104/0	108/0	107/0	103/0	103/0	103/0	108/+8	
$v$ , м/с	0,35/–34	0,19/0	0,17/0	0,34/–31	0,36/–43	0,44/–49	0,23/–8	
$d_{бм} \cdot 10^{-3}$ , м	3,4/+10	4,0/0	4,0/0	3,7/+9	4,2/+14	4,6/+28	3,2/+3	

Замечание. В числителе рациональные значения, в знаменателе изменения в %.

### *Анализ данных табл. 2*

Установлена высокая изменчивость крепости породы по глубине скважин —  $f = 4,2 \div 20,8$ .

Режим бурения в целом соответствует объемному разрушению забоя скважин, кроме скв. 158/7,31, однако не соответствует режиму рациональности —  $1,3 \leq \aleph$  и  $\aleph \leq 2,7$ , что указывает на необходимость его рационализации и оптимизации.

Анализ данных табл. 5 показывает, что отклонения модельных значений расчетных параметров ( $E_{\text{об}}$ ,  $q$ ,  $d_{\text{ср}}$ ) относительно данных табл. 3 находятся в следующих пределах:  $E_{\text{об}}$  —  $(4 \div 19)\%$ ,  $q$  —  $(0 \div 7,3)\%$ ,  $d_{\text{ср}}$  —  $(4 \div 12)\%$ , что подтверждает адекватность модели БВР реальным процессам.

### *Анализ расчетных рациональных параметров режима бурения*

Из анализа данных табл. 2, с учетом технических условий эксплуатации долота, выделены значения рациональных параметров режима бурения (см. табл. 6).

Из анализа данных табл. 6 следует, что рационализация параметров режима бурения позволяет снизить осевую нагрузку на  $(0 \div 28)\%$ , энергоемкость бурения на  $(0 \div 19)\%$ , увеличить размер среднего осколка бурового шлама на  $(0 \div 28)\%$ . Однако необходимо отметить, что рациональное снижение скорости бурения на  $(0 \div 49)\%$  указывает на нерациональность, избыточность фактической осевой нагрузки.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Krasnyukova E., Aynbinder I., Ivannikov A. A rational approach to the management of underground mining in complex hydrogeological and geomechanical conditions based on a risk assessment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 684, no. 1, article 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012006.

2. Jastrzębska M., Kazimierowicz-Frankowska K., Chiaro G., Rybak J. New frontiers in sustainable geotechnics // Applied Sciences (Switzerland). 2023, vol. 13, no. 1, article 562. DOI: 10.3390/app13010562.

Для окончательного принятия решения по рационализации параметров режима бурения необходимо их расчетные значения проверить по критерию минимума удельных затрат бурения и максимума стойкости долота [20].

## **Заключение**

В работе показана актуальность применения современных методов и технологий повышения энергоэффективности горных предприятий, в том числе применения математического моделирования и цифровых технологий.

Представлен анализ существующих решений для оптимизации технологического процесса буровзрывных работ.

В результате проведенных исследований предложена модель комплексного решения актуальных задач БВР на основе единого фракционно-энергетического подхода, позволяющая существенно повысить энергоэффективность проведения горных работ.

Установлено, что рационализация параметров режима бурения позволяет снизить осевую нагрузку и энергоемкость бурения, а также увеличить размер среднего осколка бурового шлама, что в свою очередь приводит к повышению стойкости долот и снижению удельных затрат на бурение.

Авторы констатируют, что для доведения данного подхода до промышленного уровня необходимо проведение большего количества экспериментальных исследований.

3. *Rzazade U., Deryabin S., Temkin I., Kondratev E., Ivannikov A.* On the issue of the creation and functioning of energy efficiency management systems for technological processes of mining enterprises // *Energies*. 2023, vol. 16, no. 13, article 4878. DOI: 10.3390/en16134878.

4. *Lisin E., Kurdiukova G.* Energy supply system development management mechanisms from the standpoint of efficient use of energy resources // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 666, no. 6, article 062090. DOI: 10.1088/1755-1315/666/6/062090.

5. *Rogalev N., Rogalev A., Kindra V., Naumov V., Maksimov I.* Comparative analysis of energy storage methods for energy systems and complexes // *Energies*. 2022, vol. 15, no. 24, article 9541. DOI: 10.3390/en15249541.

6. *Tsvetkov P., Samuseva P.* Heterogeneity of the impact of energy production and consumption on national greenhouse gas emissions // *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 434, article 139638. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139638.

7. *Shcherbatov I., Lisin E., Rogalev A., Tsurikov G., Dvořák M., Strielkowski W.* Power equipment defects prediction based on the joint solution of classification and regression problems using machine learning methods // *Electronics (Switzerland)*. 2021, vol. 10, no. 24, article 3145. DOI: 10.3390/electronics10243145.

8. *Сергунин М. П., Еременко В. А.* Обработка структурных геологических моделей алгоритмами искусственного интеллекта // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2023. — № 9. — С. 56–67. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_9\_0\_56.

9. *Ilyushin P., Gerasimov D., Suslov K.* Method for simulation modeling of integrated multi-energy systems based on the concept of an energy hub // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023, vol. 13, no. 13, article 7656. DOI: 10.3390/app13137656.

10. *Rogalev A. N., Sokolov V. P., Sokolova J. V., Milukov I. A., Bratukhin A. G.* Methodology of reasonable application of digital technology for creating competitive high-tech products // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, no. 10, pp. 670–678.

11. *Sizemov D. N., Temkin I. O., Deryabin S. A., Vladimirov D. Y.* On some aspects of increasing the target productivity of unmanned mine dump trucks // *Eurasian Mining*. 2021, vol. 36, no. 2, pp. 68–73. DOI: 10.17580/em.2021.02.15.

12. *Моргоева А. Д., Моргоев И. Д., Ключев Р. В., Хетагуров В. Н., Гаврина О. А.* Краткосрочное прогнозирование электропотребления обогатительной фабрики // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2023. — № 5-1. — С. 157–169. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_51\_0\_157.

13. *Егоров В. В., Волокитин А. Н., Угольников Н. В., Соколовский А. В.* Обоснование параметров и технологии производства буровзрывных работ, обеспечивающих требуемую кусковатость // *Горная промышленность*. — 2021. — № 3. — С. 110–115. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-110-115.

14. *Исайченков А. Б.* Оптимизация сопряженно выполняемых технологических процессов вскрышных работ при применении современных экскаваторно-автомобильных комплексов (на примере разреза «Тугунский»): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2017. — 23 с.


15. *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.

16. *Gadikor Joel* Optimization of drilling and blasting practices at a western us open pit copper mine // *Graduate Theses & Non-Theses*. 2018, vol. 168. [https://digitalcommons.mtech.edu/grad\\_rsch/168](https://digitalcommons.mtech.edu/grad_rsch/168).

17. *Жариков С. Н.* Взаимосвязь удельных энергетических характеристик процессов шарошечного бурения и взрывного разрушения массива горных пород: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2011. — 25 с.

18. *Teale R.* The concept of specific energy in rock drilling // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*. 1965, no. 2, no. 1, pp. 57–73. DOI: 10.1016/0148-9062(65)90022-7.

19. *Перетолчин В. А.* Вращательное и шарошечное бурение скважин на карьерах. — М.: Недра, 1983. — 175 с.

20. *Буткин В. Д., Гилев А. В.* Выбор и рациональная эксплуатация буровых инструментов и станков на карьерах: монография. — Красноярск: СФУ, 2010. — 236 с. 

## REFERENCES

1. Krasnyukova E., Aynbinder I., Ivannikov A. A rational approach to the management of underground mining in complex hydrogeological and geomechanical conditions based on a risk assessment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 684, no. 1, article 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012006.
2. Jastrzębska M., Kazimierowicz-Frankowska K., Chiaro G., Rybak J. New frontiers in sustainable geotechnics. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023, vol. 13, no. 1, article 562. DOI: 10.3390/app13010562.
3. Rzaszade U., Deryabin S., Temkin I., Kondratev E., Ivannikov A. On the issue of the creation and functioning of energy efficiency management systems for technological processes of mining enterprises. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 13, article 4878. DOI: 10.3390/en16134878.
4. Lisin E., Kurdiukova G. Energy supply system development management mechanisms from the standpoint of efficient use of energy resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 666, no. 6, article 062090. DOI: 10.1088/1755-1315/666/6/062090.
5. Rogalev N., Rogalev A., Kindra V., Naumov V., Maksimov I. Comparative analysis of energy storage methods for energy systems and complexes. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 24, article 9541. DOI: 10.3390/en15249541.
6. Tsvetkov P., Samuseva P. Heterogeneity of the impact of energy production and consumption on national greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 434, article 139638. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139638.
7. Shcherbatov I., Lisin E., Rogalev A., Tsurikov G., Dvořák M., Strielkowski W. Power equipment defects prediction based on the joint solution of classification and regression problems using machine learning methods. *Electronics (Switzerland)*. 2021, vol. 10, no. 24, article 3145. DOI: 10.3390/electronics10243145.
8. Sergunin M. P., Eremenko V. A. Application of artificial intelligence algorithm in processing structural geological models. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9, pp. 56–67. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_9\_0\_56.
9. Ilyushin P., Gerasimov D., Suslov K. Method for simulation modeling of integrated multi-energy systems based on the concept of an energy hub. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023, vol. 13, no. 13, article 7656. DOI: 10.3390/app13137656.
10. Rogalev A. N., Sokolov V. P., Sokolova J. V., Milukov I. A., Bratukhin A. G. Methodology of reasonable application of digital technology for creating competitive high-tech products. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, no. 10, pp. 670–678.
11. Sizemov D. N., Temkin I. O., Deryabin S. A., Vladimirov D. Y. On some aspects of increasing the target productivity of unmanned mine dump trucks. *Eurasian Mining*. 2021, vol. 36, no. 2, pp. 68–73. DOI: 10.17580/em.2021.02.15.
12. Morgoeva A. D., Morgoev I. D., Klyuev R. V., Khetagurov V. N., Gavrina O. A. Short-term prediction of energy consumption at concentration factory. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5-1, pp. 157–169. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_51\_0\_157.
13. Egorov V. V., Volokitin A. N., Ugolnikov N. V., Sokolovsky A. V. Justification of the parameters and technology of drilling and blasting operations that ensure the required lumpiness. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 3, pp. 110–115. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-110-115.
14. Isaychenkov A. B. *Optimizatsiya sopryazhenno vypolnyaemykh tekhnologicheskikh protsessov vskryshnykh rabot pri primenenii sovremennykh ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov (na primere razreza «Tugnuyskiy»)* [Isaychenkov A. B. Optimization of associated technological processes of stripping operations when using modern excavator-vehicle complexes (using the example of the Tugnuisky open-pit mine)], Candidate's thesis, Moscow, 2017, 23 p.
15. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Shevnina E. V., Kirsanov A. K., Kostylev S. S. Prediction of the granulometric composition of broken rock mass during open-pit mining. *Minerals and Mining Engineering*. 2020, no. 1, pp. 14–24. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-14-24.
16. Gadikor Joel Optimization of drilling and blasting practices at a western us open pit copper mine. *Graduate Theses & Non-Theses*. 2018, vol. 168. [https://digitalcommons.mtech.edu/grad\\_rsch/168](https://digitalcommons.mtech.edu/grad_rsch/168).
17. Zharikov S. N. *Vzaimosvyaz' udel'nykh energeticheskikh kharakteristik protsessov sharoshechnogo bureniya i vzryvnogo razrusheniya massiva gornyykh porod* [Interrelation of specific energy characteristics of the processes of roller-cone drilling and explosive destruction of rock massif], Candidate's thesis, Ekaterinburg, IGD UrO RAN, 2011, 25 p.



18. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*. 1965, no. 2, no. 1, pp. 57–73. DOI: 10.1016/0148-9062(65)90022-7.

19. Peretolchin V. A. *Vrashchatel'noe i sharoshechnoe burenie skvazhin na kar'erakh* [Rotary and roller drilling of wells in quarries], Moscow, Nedra, 1983, 175 p.

20. Butkin V. D., Gilev A. V. *Vybor i ratsional'naya ekspluatatsiya burovykh instrumentov i stankov na kar'erakh: monografiya* [Selection and rational operation of drilling tools and machines in quarries: monograph], Krasnoyarsk, SFU, 2010, 236 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Александров Виктор Германович* — канд. с-х. наук,

Кыргызско-Российский Славянский университет,  
Бишкек, Кыргызстан, e-mail: vikal47@rambler.ru,

*Сиземов Дмитрий Николаевич* — канд. техн. наук,  
технический директор, ООО «Вист Майнинг Технолоджи»,  
e-mail: etros@yandex.ru,

*Темкин Игорь Олегович*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор,  
зав. кафедрой, e-mail: igortemkin@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8150-6529,

*Иванников Александр Любимович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: ivannickov@bk.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4680-4584,

<sup>1</sup> НИТУ МИСИС.

**Для контактов:** Иванников А.Л., e-mail: ivannickov@bk.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.G. Aleksandrov*, Cand. Sci. (Agr.),

Kyrgyz-Russian Slavic University,  
720044, Bishkek, Kyrgyzstan, e-mail: vikal47@rambler.ru,

*D.N. Sizemov*, Cand. Sci. (Eng.), Technical Director,  
Vist Mining Technology LLC,

119334, Moscow, Russia, e-mail: etros@yandex.ru,

*I.O. Temkin*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Head of Chair, e-mail: igortemkin@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8150-6529,

*A.L. Ivannikov*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: ivannickov@bk.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4680-4584,

<sup>1</sup> NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** A.L. Ivannikov, e-mail: ivannickov@bk.ru.

Получена редакцией 27.04.2024; получена после рецензии 27.06.2024; принята к печати 10.11.2024.

Received by the editors 27.04.2024; received after the review 27.06.2024; accepted for printing 10.11.2024.

