

4. Нефелов С.В., Давыдов Ю.С. Техника автоматического регулирования в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. –М.: Стройиздат, 1984. –328 с.: ил.
5. Рымкевич А.А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. / –М.: Стройиздат, 1990 –300 с., ил.
6. Корбут В. Зональні системи кондиціонування повітря. / –К.: М+Т № 3–4, 1999. с.38–41.
7. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. / –М.: АВОК–ПРЕСС, 2002. –194 с.: ил.
8. Р. Дорф, Р. Бишоп Современные системы управления. / Пер. с англ. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. –832с.: ил.
9. Айзенберг Д.Е., Гемба В. Н., Голинко И. М. Разработка компьютерных моделей технологических систем. / –К.: Энергозберігачі технології та автоматизація №1, 2003. с.42–44.

*Отримана удосконалена залежність питомих сумарних витрат на розробку 1 т залізної руди від показника її міцності. Запропоновано структуру системи підтримки прийняття рішень для оптимізації параметрів буро-вибухових робіт в кар'єрі гірничо-видобувного підприємства*

*Ключові слова: буро-вибухові роботи, система підтримки прийняття рішень*

*Получена усовершенствованная зависимость удельных суммарных затрат на разработку 1 т железной руды от показателя ее прочности. Предложена структура системы поддержки принятия решений для оптимизации параметров буровзрывных работ в карьере горнодобывающего предприятия*

*Ключевые слова: буровзрывные работы, система поддержки принятия решений*

*Advanced dependence of total cost per unit of development 1 ton iron ore from an index of its hardness is received. Pattern of decision support system for optimization of drilling-and-blasting parameters in mine career is proposed*

*Keywords: drilling-and-blasting operations, decision support system*

УДК 004.896:622

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БУРО- ВИБУХОВИХ РОБІТ В ОПТИМІЗАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

**А.І. Купін**

Доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри\*

Контактний тел.: (056) 409-17-20

E-mail: kupin@mail.ru

**І.О. Музика**

Аспірант\*

Контактний тел.: (056) 409-17-20, 096-406-66-12

E-mail: MusicVano@mail.ru

\*Кафедра комп'ютерних систем та мереж

Криворізький технічний університет

вул. XXII партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027

### 1. Вступ

На сьогоднішній день в арсеналі гірничо-видобувних підприємств є досить багато продуктів інформаційних технологій (ІТ), які використовуються для оптимальної організації гірничих робіт: від планування і моделювання кар'єру до безпосередньо процесу видобування та переробки породи. Слід зазначити, що рівень програмного забезпечення у галузі гірничої справи за останні 20 років суттєво підвищився. Проте зараз ріст продуктивності в гірничій промисловості істотно уповільнився, оскільки гірничо-збагачувальні комбінати (ГЗК) застосовують ІТ

для покращення окремих процесів, а не виробництва в цілому [1].

За даними Геологічної служби США [2] світові запаси залізної руди складають майже 160 млрд. т та містять більше 80 млрд. т чистого заліза. Світовий видобуток залізняку за 2007 р. склав близько 2 млрд. т. В Україні зосереджені достатньо великі запаси заліза. У перерахунку на вміст заліза наша країна поступається лише Росії, Бразилії та Австралії. Проте в умовах ринкової економіки для збереження конкурентоздатності до продукції вітчизняних ГЗК висуваються особливо високі вимоги. Так, наприклад, вміст заліза у вихідному концентраті повинен сягати 68-70%. Зважаючи на

ускладнення гірничо-геологічних умов розробки, постійним поглибленням кар'єрів та зменшенням частки легко збагачувальних руд питання економії енергоресурсів є сьогодні надзвичайно актуальним.

## 2. Постановка проблеми у загальному вигляді

Основним напрямком подальшого розвитку кар'єрів ГЗК є зниження витрат енергоресурсів та підвищення якості подрібнення гірської маси. До основних кар'єрних технологічних процесів ГЗК належать: буріння свердловин, заряджання їх вибухівкою та підрив, екскавація та транспортування, повторне подрібнення негабаритних шматків, а також крупне механічне дроблення на дробильно-збагачувальній фабриці (рис. 1).

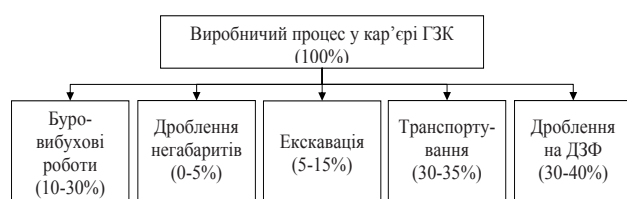


Рис. 1. Структура виробничого процесу ГЗК за питомою вагою витрат

Із практики роботи гірничих підприємств відомо, що при поганій якості вибуху різко знижується продуктивність гірничотранспортного устаткування, його надійність, збільшуються простой, скорочується добовий видобуток кар'єру. Так збільшення середнього розміру шматка висадженої гірської маси з 145 до 220 мм зумовлює зростання питомих витрат на екскавацію з 2,1 до 2,46 грн./м<sup>3</sup>, що складає майже 15%. Тому для гірничо-видобувної промисловості досить важливим стає питання впливу інтенсивності дроблення порід на показники окремих технологічних процесів та ефективність відкритої розробки в цілому.

## 3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблеми оптимізації параметрів буро-вибухових робіт (БВР) досліджувалися в роботах багатьох вітчизняних вчених О.С. Фідельова, Г.С. Генералова, Е.І. Єфремова та ін. Питаннями залежності енергоспоживання екскаваторів від частки негабаритів у кар'єрі займалися такі науковці як Ю.Ф. Ходаковський та І.А. Тангаєв. Проте, на думку авторів, найбільш близькі до поставленої задачі роботи І.П. Кононова та М.Ф. Друкованого [3, 4]. У цих дослідженнях проведено детальний аналіз технологічного зв'язку процесів розробки з якістю подрібнення гірської маси вибухом при циклічній, циклічно-поточній та поточній технології гірничих робіт. При цьому встановлені закономірності виходу фракцій подрібнення висадженої гірської маси. Дані роботи особливо цінні, оскільки в них наводиться методика комплексного дослідження впливу грудкуватості порід на техніко-економічні показники роботи ГЗК, а також обґрунтовується раціональний гранулометричний склад порід за критерієм мінімізації приведених витрат.

Проте вищезгадані дослідження не достатньо розкривають характер «дрейфу» залежності оптимальних параметрів БВР від фізико-механічних властивостей різноманітних сортів руди. Так, наприклад, в кар'єрі Інгулецького ГЗК нараховується близько 7-и різних сортів, що відрізняються міцністю, абразивністю та здатністю до збагачення. Наявність навіть 3 або 4-х технологічних сортів зумовлює значні коливання оптимуму сумарних приведених витрат. Крім того, при впровадженні методик розрахунку та проектування БВР, розроблених цими вченими, не застосовувалися можливості ІТ для оптимізації, яких у середині 80-х років ще не існувало.

## 4. Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Отже, основні процеси ГЗК є досить енергоємними і потребують оптимізації. Велика кількість технологічних параметрів, їх стохастичний характер і часто наявність певної невизначеності роблять практично неможливим процес оптимізації в ручному режимі. Складність прийняття рішень в процесі стратегічного керування підприємством вимагає впровадження засобів обчислювальної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення. Виходячи з цього, в даній статті було вирішено узагальнити та проаналізувати математичну модель, яка б описувала повний ланцюг технологічних процесів починаючи від буріння свердловин в кар'єрі ГЗК і закінчуючи подрібненням руди на дробильно-збагачувальній фабриці, з урахуванням показника міцності порід. Таким чином, розробка інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР) для оптимізації БВР є зараз актуальним завданням, вирішення якого допоможе зменшити собівартість продукції підприємства та поліпшити ритмічність його роботи.

## 5. Виклад основного матеріалу дослідження

Враховуючи різний характер впливу крупності порід на техніко-економічні показники процесів розробки, оптимальні параметри БВР визначають за умови мінімуму сумарних питомих витрат на видобуток 1 т залізної руди, тобто

$$S(f, D_{CP}) = S_{BVP} + S_H + S_E + S_A + S_{DP} \quad [\text{грн./т}], \quad (1)$$

де  $S_{BVP}$  – питомі витрати на проведення буро-вибухових робіт;  $S_H$  – дроблення негабаритних шматків середнім діаметром більше 1000 мм;  $S_E$  – екскаваторні роботи;  $S_A$  – транспортування за допомогою автосамоскидів;  $S_{DP}$  – крупне механічне дроблення на фабриці, грн./т.

На рис. 2 представлені криві питомих приведених витрат (сумарних і за окремими технологічними процесами) в залежності від середнього розміру шматків висадженої гірської маси при міцності породи  $f = 12$ . Найменші витрати на видобуток 1 т руди досягаються при оптимальному розмірі шматків породи  $D_{CP} = 130$  мм.

Зменшення крупності руди сприяє зниженню питомих витрат за всіма процесами розробки, але при

цьому різко зростають витрати на буровибухові роботи. Наприклад, із зменшенням середнього розміру шматка від 250 до 130 мм витрати на БВР збільшуються майже у 2,5 рази – від 0,57 до 0,14 грн./т; за рештою процесів вони знижуються на 2,18 грн./т (16%), зокрема: за екскаваторними роботами – на 0,45 грн./т (29,6%), автотранспорту – на 0,26 грн./т (7,8%), дробленню на фабриці – на 1,26 грн./т (15,2%). У результаті сумарні витрати зменшуються на 1,34 грн./т, що складає 9,6%.

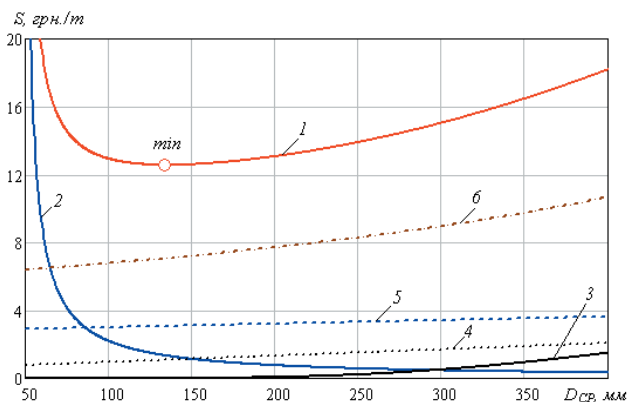


Рис. 2. Залежність питомих витрат на видобування руди S від середнього розміру шматка D<sub>CP</sub>: 1 – сумарні витрати; 2 – витрати на проведення БВР; 3 – витрати при подрібненні негабариту; 4 – витрати на екскавацію; 5 – витрати на транспортування; 6 – витрати на крупне механічне дроблення

Питома вага технологічних процесів у загальній сумі витрат з видобутку руди неоднакова, до того ж вона змінюється залежно від ступеня подрібнення (табл. 1).

Таблиця 1

Питома вага технологічних процесів у сумарних витратах на видобуток руди, %

Процеси	Середній розмір шматків породи, мм					
	100	150	200	250	300	350
БВР	16,96	8,91	5,77	4,08	3,03	2,30
Дроблення негабариту	–	0,05	0,44	1,53	3,36	5,69
Екскаваторні роботи	7,42	9,09	10,18	10,91	11,31	11,46
Автотранспорт	23,20	24,65	24,56	23,84	22,73	21,39
Дроблення на фабриці	52,42	57,30	59,05	59,64	59,57	59,16
Разом	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

За наведеними даними бачимо, що основними є витрати на механічне дроблення на дробильно-збагачувальній фабриці. При цьому витрати на переробку за допомогою дробарок типу ККД-1500/180 у загальній сумі витрат з видобування руди досягають 50–60%. Слід зазначити, що найбільш інтенсивно змінюються витрати на БВР: наприклад, із збільшенням середнього розміру шматка руди від 100 до 350 мм їх вплив знижується більш ніж у сім разів. Транспортні операції складають приблизно 25% всіх витрат і мало залежать від крупності руди у кар'єрі.

Дослідження, проведені авторами, показали, що оптимальний розмір шматка в кар'єрі ГЗК не є величиною постійною, а залежить від різних фізико-механічних властивостей породи, зокрема: від міцності руди та ступеня обводненості бурових свердловин. Саме цей науковий факт змушує шукати спеціальні алгоритми для СППР з метою визначення оптимальних параметрів БВР. «Дрейф» оптимальної крупності руди D<sub>CP</sub> в залежності від показника міцності породи наведено на рис. 3. Геометричне місце мінімумів сумарних питомих витрат при циклічно-потоківій технології розробки залізної руди апроксимується прямолінійним трендом з високим коефіцієнтом детермінації R<sup>2</sup> > 0,9.

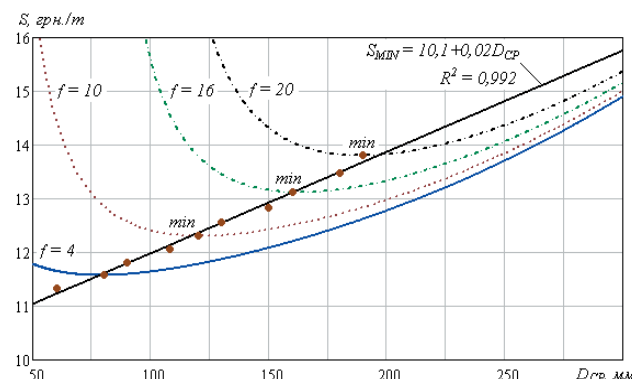


Рис. 3. Тренд мінімумів сумарних питомих витрат у залежності від міцності гірської породи

Аналіз графічної залежності рис. 3 показує, що при зменшенні показника міцності породи з 20 до 10 за шкалою М.М. Протод'яконова загальні витрати на розробку 1 т руди можуть бути знижені майже на 1,5 грн./т, що складає 10,9%. Це пояснюється меншими витратами на проведення БВР в порівнянні з більш міцними породами. Крім того при цьому переміщується і область мінімуму в сторону меншої крупності руди. Так, якщо для руди з показником міцності f = 20 оптимальним слід вважати середній діаметр 190 мм, то для руди з f = 8 мінімальні витрати забезпечить діаметр 115 мм.

Вищезазначену графічну залежність можна розглянути з точки зору функції D<sub>CP</sub><sup>MIN</sup>(f), тобто залежності оптимальної крупності гірської маси від її показника міцності (рис. 4).

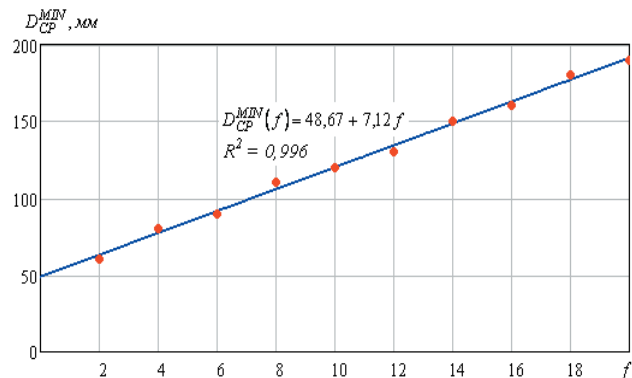


Рис. 4. Залежність оптимального середнього розміру шматків породи D<sub>CP</sub> від її показника міцності f

Таким чином, проведені дослідження дають змогу сформулювати наступне наукове положення: оптимальний середній розмір шматків породи в кар'єрі ГЗК, який забезпечує мінімум сумарних питомих витрат на розробку 1 т руди, прямо пропорційно залежить від показника міцності руди і описується формулою

$$D_{CP}^{MIN}(f) = a + bf \text{ [мм]}, \quad (2)$$

де  $a, b$  – емпіричні коефіцієнти, отримані методом найменших квадратів ( $a = 48,67; b = 7,12$ ).

На рис. 5 представлена функціональна схема інтелектуальної СППР та інформаційні потоки, які циркулюють в системі.

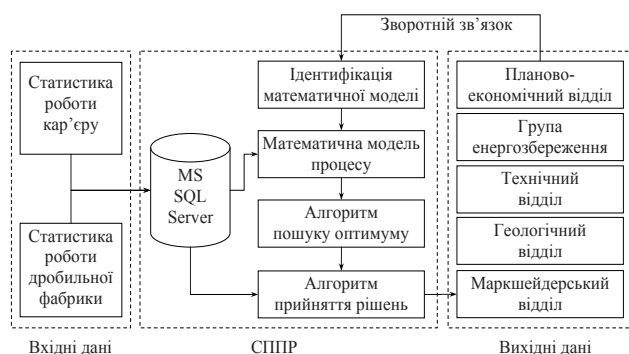


Рис. 5. Функціональна схема СППР

Головним сховищем інформації є виробнича база даних типу MS SQL Server, що накопичує статистику роботи кар'єру та дробильної фабрики. Алгоритм прийняття рішень призначений для формування паспорту проведення буро-вибухових робіт, яким керується маркшейдерський та геологічний відділи. Модуль пошуку оптимального, аналізуючи фізико-механічні характеристики руди в кар'єрі, знаходить такий гранулометричний склад, що відповідає найменшим сумарним питомим витратам на виробництво 1 т руди. Математична модель технологічного процесу будується на основі статистичних даних за допомогою регресійного аналізу. Вона постійно коригується під дією зворотного зв'язку.

На рис. 6 наведено узагальнену блок-схему алгоритму роботи СППР. При цьому у якості вхідних параметрів задаються:  $f$  – міцність породи за шкалою М.М. Протод'яконова;  $V$  – об'єм висадженої гірської маси,  $m^3$ ;  $BP$  – тип вибухової речовини. У результаті розрахунків, СППР видає рекомендації щодо таких параметрів паспорту БВР як  $q$  – енерго-

насиченість масиву,  $кг/м^3$ ;  $W$  – густина сітки свердловин,  $м\text{хм}$ ;  $S$  – сумарні питомі витрати,  $грн./т$ .

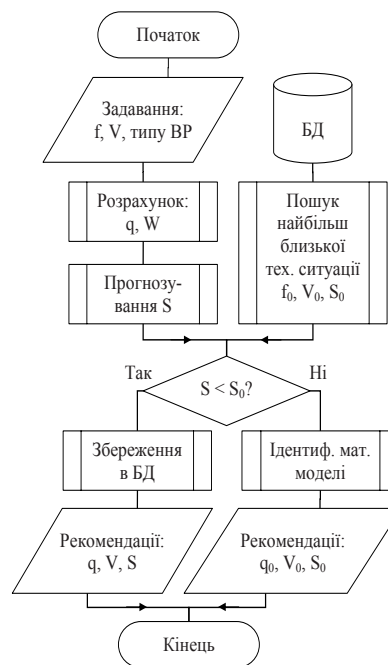


Рис. 6. Узагальнений алгоритм прийняття рішень

Підпрограма коригування математичної моделі допомагає відслідковувати стохастичні зміни техніко-економічних параметрів обладнання.

## 6. Висновки та перспективи подальших досліджень

Таким чином, у результаті проведених досліджень вдалося підтвердити екстремальний характер залежності сумарних питомих витрат на розробку 1т залізної руди від крупності висадженої гірської маси в кар'єрі. При цьому удосконалена математична модель визначила «дрейф» екстремуму в залежності від зміни фізико-механічних властивостей породи. Емпіричні та функціональні залежності, дані пасивного експерименту дали змогу отримати висновок, згідно з яким оптимальний середній розмір шматка гірської маси пропорційний показнику міцності породи. Як показує аналіз залежності (рис. 3), провадження СППР дозволяє при зменшенні показника міцності породи з 20 до 10 за шкалою М.М. Протод'яконова зменшити загальні питомі витрати до 1,5 грн./т.

## Література

- Капутин Ю.Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика / Капутин Ю.Е. – СПб.: Недра, 2002. – 324 с.
- John D. Jorgenson, Michelle B. Blackwell // U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2007. Iron Ore [Advance Release]. – 2009. – p. 22.
- Кононов И.П. Влияние интенсивности взрывного дробления на эффективность процессов добычи и переработки железистых кварцитов: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.15.03 «Открытая разработка и эксплуатация угольных, рудных и нерудных месторождений» / И.П. Кононов. – Кривой Рог, 1982. – 20 с.
- Влияние дробления пород на эффективность технологических процессов открытой разработки / [Друкованый М.Ф., Тартаковский Б.Н., Вишняков В.С., Ефремов Э.И.]. – К.: Наукова думка, 1974. – 269 с.
- Оптимизация процессов открытой разработки полезных ископаемых с помощью интеллектуальных информационных технологий: материалы XVII международной конференции по автоматическому управлению [«Автоматика-2010»], (27–29 сентября 2010 г. Харьков, Т. 2) / М-во образования и науки, ХНУРЭ. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – С. 176–177.