

7. **Han Y.** The anti-disturbance performance study of voltage source inverter with active disturbance rejection control / **Y. Han, H. Xiong** // IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). – Chongqing, China, 2019. – Pp. 1101-1105
8. **Lee H.** Accurate Neutral Current Control for Neutral Point Voltage Balancing in Three-Level Inverters Considering Digital Control and PWM Delay / **H. Lee, S. Kim and Y. Yoon** // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Baltimore, USA, 2019. – Pp. 4795-4800
9. **Mohammed L.A.** Voltage to Frequency Speed Control of Induction Motor using Cascaded Multilevel inverter / **L.A. Mohammed** // 2nd International Conference on Electrical, Communication, Computer, Power and Control Engineering (ICECCPCE). – Mosul, Iraq, 2019. – Pp. 148-152
10. **Hao W.** Droop Control Method of Inverter Based on Variable Virtual Impedance / **W. Hao, C. Zheng, Q. Wang, T. Rui** // 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – Xi'an, China, 2019. – Pp. 1167-1172

Рукопис подано до редакції 31.03.2021

УДК 621.926.23.001.2

В.І. КЛЯЦЬКИЙ, канд.техн.наук, доц., Л.А. БУГАЙ, ст. викл.,
Н.С. ЗАПОРОЖЕЦЬ, студ.
Криворізький національний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНУСНОЇ ДРОБАРКИ МІЛКОГО ДРОБЛЕННЯ

Мета. Експериментальна розробка конструкції футировочної броні дробарки дрібного дроблення, що утворюють камеру дроблення, і вплив її на технологічні параметри.

Методи досліджень. У роботі застосовані загальноприйняті методи теорії дроблення, варіаційного обчислення, статистичної обробки експериментальних і теоретичних досліджень, великим об'ємом лабораторних експериментів з використанням сучасних методик і вимірювальної апаратури. Для проведення експериментів застосовувалося рототабельне планування другого порядку з наступною обробкою результатів на ЕОМ.

Наукова новизна. Дослідження методів і засобів підвищення ефективності роботи конусних дробарок базується на більш-менш повному обсязі обліку діючих факторів і призводить до необхідності розгляду цілого комплексу причин. Проведено експериментальні дослідження, що включають визначення впливу профілю камери дроблення, твердості гірських порід, величини розвантажувальної щільності, на продуктивність і якість продукту дроблення. Встановлено математичну модель у вигляді рівнянь регресії, отриманих статистичними методами на базі експериментів, зібраних безпосередньо при проведенні експериментів. Для вирішення поставлених завдань було використано метод рототабельного планування другого порядку, який дозволив поряд з отриманням математичної моделі процесу, провести статистичну оцінку отриманих результатів. При плануванні експериментів в якості змінних факторів прийняті: обсяг камери дроблення, міцність подрібнювальних руд, розмір розвантажувальної щільності, довжина зони калібрування.

Практична значимість. На моделі конусної дробарки дрібного дроблення (М 1: 5) проведено експериментальні дослідження по визначенню впливу профілю камери дроблення при різних значеннях розвантажувальної щільності дробарки, що переробляє різну по міцності руду на продуктивність дробарки і вихід готового класу продукту дроблення.

Результати. Отримано оптимальні значення обсягу камери дроблення, розмір розвантажувальної щільності, довжина зони калібрування при різних конструктивно-механічних параметрах моделі конусної дробарки дрібного дроблення з різними профілями камери дроблення.

Ключові слова: конусна дробарка, камера дроблення, профіль.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-82-85

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. При експериментальних дослідженнях, що включають визначення впливу профіля камери дроблення, міцності переробляємих руд, величини розвантажувальної щільності, на продуктивність і якість продукту дроблення, раціонально застосувати планування експерименту [1]. Цим методом визначається математична модель не у вигляді рівнянь динаміки, а в вигляді регресії отриманих статистичним методом на базі інформації, зібраної безпосередньо при проведенні експерименту. Метод рототабельного планування другого порядку [2] поряд з отриманням математичної моделі процесу дозволяє скоротити об'єм експериментальних досліджень і провести сувору статистичну оцінку отриманих результатів.

Аналіз досліджень і публікацій. Кількісні і якісні показники роботи дробильної фабрики на сучасних ГЗК в значній мірі визначаються ефективністю роботи дробарок середнього і дрібного дроблення [3]. Величина продукту дроблення і його гранулометричний склад є головними показниками, що характеризують якісну сторону процесу дроблення. З закономірностей процесу дроблення в дробарках середнього і дрібного дроблення значний інтерес представляють залежності між гранулометричним складом дробленого продукту і параметрами профілю простору, що дробить. Для забезпечення ефективної роботи конусних дробарок камера дроблення їх повинна задовольняти ряду вимог [4]: за одиницю часу в камеру дроблення не повинно надходити матеріалу більше, ніж в ній може бути роздроблено і може розвантажитися за цю ж одиницю часу; в камері дроблення, нижче його приймальної зони, розташовуватися з зазором між окремими шматками; шматки руди, що потрапили в зону дроблення в якийсь із циклів прийому, не повинні спиратися на шматки руди, що потрапили в зону дроблення циклом раніше; камера дроблення повинна мати зону дроблення і зону калібрування продукту. Характеризуватися такими параметрами: (кількістю) роздробленої руди в кожному перетині по глибині камери дроблення; інтенсивністю лінійного зношування робочих поверхонь рухомої і нерухомої броней; довжиною шляху руху шматків руди в камері дроблення за один оборот ексцентрика; величиною наклепу робочих поверхонь броней від силового впливу шматків руди при їх роздавлюванні, твердістю по Бринелю НВ; фізико-механічними властивостями подрібнюваністю гірської маси і матеріалу робочих поверхонь броней, що виготовляються зі сталі 110М13Л [5]. Зазначені параметри визначають ефективність процесу дроблення, а від деяких з них залежить процес зношування робочих поверхонь рухомої і нерухомої броней, що утворюють камеру дроблення. Дослідження методів і засобів підвищення ефективності роботи конусних дробарок базується на повному обліку діючих факторів і призводить до необхідності розгляду цілого комплексу причин ефективної роботи [6].

Постановка задачі. Застосування методу рототабельного планування другого порядку з метою встановлення експериментально деяких параметрів моделі конусної дробарки.

Виклад матеріалу і результати. З використанням цього методу проведені дослідження процесу дроблення руди на моделі дробарки дрібного дроблення з різними профілями камери дроблення. В якості змінних факторів прийняті такі параметри: обсяг камери дроблення, міцність руди, що подрібнюється; розмір розвантажувальної щілини і довжина зони калібрування. Як функції відгуку прийняті такі визначальні показники, як продуктивність дробарки, крупність продукту дроблення. Рівняння регресії, отримане на підставі експерименту має вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_i + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \dots + b_{ii}x_i^2 + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{ij}x_ix_j, \quad (1)$$

де кодована змінна x_i пов'язана з натуральною змінною X_i формулою

$$x_i = \frac{X_i - x_i^0}{S_i} \quad (2)$$

де x_i^0 – значення змінної на нульовому рівні; S_i – одиниця варіювання натуральної змінної.

Після перетворень, розкриваючи значення кодових змінних згідно (2), отримаємо рівняння регресії з натуральними змінними

$$y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_iX_i + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + \dots + B_{ii}X_i^2 + B_{13}X_1X_3 + \dots + B_{ij}X_iX_j \quad (3)$$

Продиференціювавши (3) по кожній змінній і прирівнявши вираз нулю, отримаємо систему диференціальних рівнянь, при вирішенні яких на ЕОМ отримаємо оптимальне значення змінного фактора.

Оцінка адекватності отриманих результатів проводиться за допомогою критерію Фішера. Оскільки промислова дробарка дрібного дроблення не придатна для проведення тривалих експериментальних досліджень в силу великої продуктивності, був створений лабораторний стенд, який представляє модель конусної дробарки 2200, виконану з коефіцієнтом геометричної подоби $C=5$ [7]. Залежно від характеру руху і сил, що проявляються при цьому, можливі різні масштабні часово-просторові співвідношення між параметрами моделі і натурної машини.

Часово-просторові співвідношення знаходяться в тому випадку, коли є функціональні залежності між окремими параметрами машини.

Швидкість обертання валу-ексцентрика виражається формулою

$$n = \sqrt{\frac{69(\sin \gamma - f \cos \gamma)}{D_k}}, \quad (4)$$

де γ - кут нутації конуса, що дробить; D_k – діаметр основи конуса.

Між величинами швидкостей натурної машини і моделі існує співвідношення

$$C_n = \frac{n_n}{n_m} = \frac{60 \sqrt{\frac{69(\sin \gamma - f \cos \gamma)}{D_{кн}}}}{60 \sqrt{\frac{69(\sin \gamma - f \cos \gamma)}{D_{км}}}} = \sqrt{\frac{D_{кн}}{D_{км}}} = \frac{1}{\sqrt{C_r}} \quad (5)$$

де C_r – коефіцієнт геометричної подібності.

Робочий процес конусної дробарки визначає наступні величини: міцність дробленого матеріалу на стиск – σ (МПа); число обертів валу – ексцентрика – n , об/с; діаметр основи конуса – D_k , м; продуктивність – Q , н/с; зусилля дроблення – R (МН); потужність – N (Вт).

Загальна функціональна залежність, що характеризує процес дроблення, може бути записана в вигляді

$$f(\sigma, n, D_k, Q, R, N) = 0. \quad (6)$$

Аналітичне отримання цієї залежності практично неможливо, а експериментальне визначення трудомістке. Завдання вирішується з використанням Π - теореми, згідно з якою залежність може бути представлена у вигляді залежності між критеріями подібності. Для переходу до критеріїв подібності вибираємо в якості основних одиниць D_k, n, σ . Переконаємося в тому, що визначних не равен нулю

$$\sigma = [M]^1 [L]^{-1} [T]^{-2}; \quad n = [M]^0 [L]^0 [T]^{-1}; \quad D = [M]^0 [L]^1 [T]^0;$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 1.$$

Розмірність інших величин в нових одиницях наступна

$$[Q] = \frac{[\sigma] [D]}{[n]}; \quad [R] = [\sigma] [D]^2; \quad [N] = [\sigma] [D] [n].$$

Застосовуючи метод нульових розмірностей, отримаємо

$$f(1, 1, 1, \frac{Q \times n}{\sigma \times D}, \frac{R}{\sigma D^2}, \frac{N}{\sigma D^3 n}) = 0 \text{ або } \Phi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 0, \quad (7)$$

де $\Pi_1 = \frac{Q \times n}{\sigma \times D}$; $\Pi_2 = \frac{R}{\sigma D^2}$; $\Pi_3 = \frac{N}{\sigma D^3 n}$ - безрозмірні критерії подібності.

При проектуванні моделі отримані залежності використовувалися для визначення інших часо-просторових співвідношень

$$C_r = C_r^2; \quad C_n = C_r^3 \frac{1}{\sqrt{C_r}} = C_r^{2,5}.$$

Перевіримо значення часо - просторових співвідношень C_R і C_N , користуючись формулами для визначення зусиль і потужності привода. Рівнодіюча зусиль дроблення [8]

$$R_n = 16,85 \frac{g_0 F \cos \alpha}{36}, \quad (8)$$

де g_0 - питомий тиск матеріалу в зоні дроблення; F – загальна площа броні конуса, що дробить; α - кут нахилу броні конуса що дробить.

Приймаючи g_0 і α однаковими для моделі натурної дробарки, визначаємо

$$C_R = \frac{16,85 \times F_n \times \cos \alpha \times 36}{16,85 \times F_m \times \cos \alpha \times 36} = C_r^2$$

Споживана потужність при дробленні дорівнює

$$N = \frac{3F \times \alpha_{cp} \times n_0}{\eta}, \quad (9)$$

де F – бокова поверхня конуса, що дробить; α_{cp} – ексцентриситет в середній частині конуса; n_0 – число коливань конуса в хвилину; η – к.к.д. механізму дробарки.

Приймаючи η однаковим для моделі і реальної машини, знаходимо

$$C_N = \frac{3F_n \times \alpha_{cp,n} \times n_{0n} \times \eta}{3F_m \times \alpha_{cp,m} \times n_{0m} \times \eta} = C_r^2 \times C_r \times \frac{1}{\sqrt{C_r}} = C_r^{2,5}.$$

Число обертів валу-ексцентрика моделі дорівнює

$$n_m = n_n \sqrt{C_r} = 23,46 \sqrt{5} = 52,36 \text{ (с}^{-1}\text{)}, \quad (10)$$

де $n_n = 23,46 \text{ с}^{-1}$ - швидкість обертання валу - ексцентрика реальної дробарки 2200.

Потужність двигуна моделі

$$N = \frac{N_n}{C_r^{2,5}} = \frac{320 \times 10^3}{5^{2,5}} = 5,72 \times 10^3 \text{ Вт}, \quad (11)$$

де $N_n = 320 \times 10^3 \text{ Вт}$ - потужність привода дробарки КМДТ -2200.

Використовуючи отримані дані C_N , C_n , C_R визначаємо значення потужності, зусилля і продуктивності натурної дробарки за експериментальними значеннями цих параметрів, отриманих на моделі. В якості змінних факторів приймалися: вихід дробленого продукту; обсяг камери дроблення; зміна розміру розвантажувальної щілини; межі зміни коефіцієнта міцності руди; довжина зони калібрування.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Після обробки експериментальних даних, отримані рівняння регресії для продуктивності і крупності продукту дроблення; визначені оптимальні значення змінних факторів при яких досягається максимальна продуктивність і оптимальний вихід готового класу в продукті дроблення.

Список літератури

1. Протодьяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования эксперимента. М., Наука, 1970, 116с.
2. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. Наука, М., 1969, 511с.
3. Шестаков А.М., Кляцкий В.И., Джур В.А. Влияние изменения профиля камеры дробления дробилки КМДТ-2200 на формирование дробленого продукта. -Изв. вузов. Горный журнал. 1984 №5, с.65-69.
4. Ушаков В.С.К вопросу о расчете и проектировании дробящего пространства конусных дробилок мелкого и среднего дробления. -Вопросы исследования и проектирования машин и оборудования. Сб. трудов УДН, 1977, с.128-129.
5. Зверховский Я.Я., Быков В.И., Бондарец А.И. Стенд для исследований конусных дробилок с консольным валом. А.с. №368875, Бюл. Информаций, №10, 1973.
6. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. - М., Недра, 1980, 415с.
7. Алабужев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М. и др. Теория подобия и размерностей. Моделирование. - Высшая школа, 1968, 208с.
8. Олевский В.А. Конструкция, расчеты и эксплуатация дробилок. М., 1958, 460 с.

Рукопис подано до редакції 19.03.2021

УДК 622.1:528.024

Л.В. ДОЛГІХ, канд. техн. наук доц., С.В. ДІХТЯР, А.О. ТОМАШЕВСЬКА, аспіранти
Криворізький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ФОТОГРАМЕТРІЇ В УМОВАХ ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

Мета. Метою роботи є дослідження питання використання методів цифрової фотограмметрії в умовах підземних гірничих виробок для підвищення ефективності маркшейдерського забезпечення гірничих робіт.

Методи дослідження. В роботі використані методи теоретичного аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, на основі якого обґрунтована доцільність розробки та впровадження у виробництво цифрових технологій для вирішення задач маркшейдерського забезпечення гірничих робіт, а також використані експериментальні роботи з дослідження впливу складних умов підземної розробки родовищ на якість цифрового знімання.

Наукова новизна. В роботі запропоновано шляхи удосконалення методик виконання орієнтирно-з'єднувальних зйомок та передачі позначки на глибокі горизонти шахти з використанням сучасних наукових досягнень в галузі приладобудування та програмного забезпечення вимірювальних та обчислювальних робіт. Розглянуто можливість використання цифрової зйомки для підвищення ефективності цих робіт, для чого виконані експериментальні роботи з дослідження впливу стиснених умов шахти, обмеженої видимості та запиленості і вологості повітря. Встановлена можливість використання фотограмметричних методів, які забезпечать високу оперативність виконання робіт та необхідну точність. Визначено основні фактори впливу на точність маркшейдерських зйомок, які виконуються з використанням цифрової фотограмметрії в умовах, наближених до підземних виробок.

Практична значимість. Встановлені переваги та недоліки використання сучасних приладів та методів виконання орієнтирно-з'єднувальних зйомок та передачі висотних позначок на глибокі горизонти шахт у порівнянні з