

Рис. 8. Швидкість буріння

Висновки. Результати виконаних досліджень свідчать про те, що модифікований ПИ-регулятор успішно справляється з поставленою задачею. Його перевагою перед стандартним ПИД-регулятором є краще швидкодія та стійкість до шумів.

Список літератури

1. Баранникова І.В. Розробка моделей і алгоритмів управління шарошечним станком в режимі буріння / Баранникова І.В. // Дис. канд. техн. наук / Московський державний горний ун-т. - М., 2003. - 134 с.
2. Glass B., Cannon H., Hanagud S., Frank J. Drilling automation for subsurface planetary exploration // Technical Paper, NASA, Ames Research Center, Moffett Field, CA, USA. - 2006.
3. Aboujaoude C.E. Modeling, simulation and control of rotary blasthole drills / Aboujaoude C.E. // Master's Thesis / McGill University. - 1991/
4. Daniel Joseph Lucifora. Comparative modeling, simulation, and control of rotary blasthole drills for surface mining / Daniel Joseph Lucifora // Master's thesis / Queen's University, - 2012.
5. Паранюк Д.И. Формування моделі геологічної структури на основі аналізу параметрів процесу буріння / Паранюк Д.И. // Вісник Криворізького національного університету, 2013. - Вип. 34. - С. 94-96.

Рукопис подано до редакції 23.03.13

УДК 621.926.3:004.942

О.Ю. МИХАЙЛЕНКО, асистент, ДВНЗ «Криворізький національний університет»,

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОНУСНОЇ ДРОБАРКИ З УРАХУВАННЯМ РОЗДІЛЕННЯ КАМЕРИ ДРОБЛЕННЯ НА ЗОНИ

Розроблено математичну модель конусної дробарки з розділенням камери дроблення на зони, яка враховує фізико-механічні властивості руди і енергетичні характеристики технологічного процесу.

Проблема і її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Агрегати, що входять в технологічний потік процесів рудопідготовки виконують функції переробки матеріалу, що поступає в головні механізми, транспортування готової продукції і складування її у бункерах. Використання короткоконусних дробарок дрібного дроблення з пологим конусом на кінцевих стадіях технологічного процесу отримало достатньо широке розповсюдження. Відмінність даного типу дробарок обумовлюється формою дробильного конусу, збільшеною паралельною зоною і зменшеним розміром вихідної щілини [1].

Для ефективного керування рудопідготовкою потрібно детально розглядати процеси, що відбуваються у дробарках. Складність виконання промислових випробувань на реальних установках обумовлює необхідність розробки адекватних математичних моделей технологічних агрегатів для дослідження режимів їх роботи.

Аналіз досліджень і публікацій. При математичному описі процесів дроблення часто використовується підхід заснований на матричному аналізі, вперше запропонований в роботі [2], який став класичним методом аналізу операцій зменшення крупності кускового матеріалу. Відповідно до нього матеріал, що потрапляє у камеру дроблення може або переміщуватися вниз, або відбиратися для руйнування. Модель відображає взаємозв'язок між живленням і вихідною продуктивністю. При цьому руда розподіляється за класами крупності.

Спираючись на матричну модель у дослідженні [3] по аналогії з термодинамічними процесами було представлено рівняння в частинних похідних, яке описує матеріальний баланс у деякому обмеженому об'ємі конусної дробарки. В якості керуючих дій використовувалися швидкість обертання ексцентрику і ширина розвантажувальної щілини. Розрахунки у пакеті MATLAB/Simulink показали, що при низькій швидкості модель дає не реалістичні результати – необмежене зростання продуктивності агрегату.

У роботі [4] наведено математичну модель конусної дробарки з розділенням камери дроблення на послідовні зони. В моделі було враховано швидкість переміщення руди по камері дроблення і обмеження на місткість кожної зони. До основних недоліків можна віднести відсутність опису енергетичних показників процесу дроблення і підхід до аналізу впливу фізико-механічних властивостей руди на роботу об'єкту відповідно до якого продуктивність по матеріалу з різними характеристиками розглядається окремо одна від іншої.

Постановка завдання. Метою роботи є удосконалення математичної моделі конусної дробарки з розділенням камери дроблення на зони, яка дозволить виконати аналіз впливу фізико-механічних властивостей вхідного матеріалу на режими функціонування агрегату, а також врахувати витрати електроенергії на дроблення.

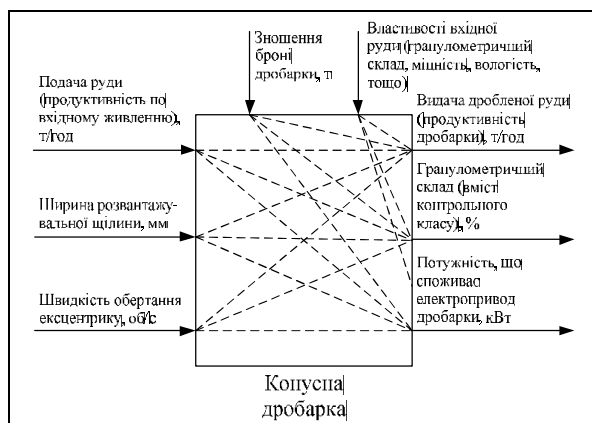
Викладення матеріалу і результати. Призначенням конусної дробарки є зменшення крупності кускового матеріалу до необхідного розміру. Отже головними технологічними величинами, що керуються є продуктивність і гранулометричний склад продукту на виході агрегату.

Під час функціонування дробарки на неї діють не тільки головна вхідна величина - продуктивність по вхідному живленню і збурююча дія, що представляється сукупністю параметрів, які характеризують властивості руди (вміст контрольного класу крупності, твердість, тріщинуватість, вологість, наявність глиняних включень і ін.), але і інші важливі допоміжні вхідні величини до яких відносяться ширина розвантажувальної щілини і швидкість обертання ексцентрикового стакану.

Процес дроблення разом з головними технологічними вихідними величинами характеризується також потужністю, що споживає електропривод агрегату, зносом футерувальних плит, рівнем заповнення дробарки рудою.

Отже, для керування дробаркою і контролю її роботи є достатньо багато вхідних та вихідних координат. Зв'язок між ними демонструє функціональна схема агрегату (рис. 1).

Рис. 1. Конусна дробарка, як багатомірний і багатозв'язний об'єкт керування



В якості об'єкту дослідження статичних властивостей обираємо універсальну конусну дробарку Sandvik Hydrocone H7800, яка встановлена, як у корпусах середнього, так і дрібного дроблення дробильної фабрики №2 «НКГЗК» ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Вибір цього типу агрегату обумовлюється наявністю пристроїв для автоматичного регулювання ширини розвантажувального отвору і швидкості обертання робочого органу.

Відповідно до технологічної інструкції в агрегат дрібного дроблення потрапляє руда

крупністю якої не перевищує 75 мм. При цьому крупність продукту дроблення не повинна перевищувати 14,5%+1,2% класу розміром більше 20 мм.

При використанні матричного підходу до моделювання конусної дробарки матеріал, що піддається дробленню може бути представлений вектором-стовпчиком M , елементи якого описують розподіл масової продуктивності руди за класами крупності, які задаються вектором-

стовпчиком d .

Для розподілу продукту живлення по крупності приймається скорочене розподілення Розіна-Рамлера [5], яке визначає частку руди, яка менше розміру d

$$P(d) = \begin{cases} 1 - e^{-(\eta/\eta_{63})^\alpha}, & \text{якщо } d \leq d_0, \\ 1, & \text{якщо } d > d_0, \end{cases} \quad (1)$$

де $\eta = d/(d_0 - d)$ і $\eta_{63} = d_{63}/(d_0 - d_{63})$, d_0 - найбільша крупність руди у вхідному продукті, м; d_{63} - крупність на яку приходить 63% руди від її загальної кількості, м; α - параметр.

Щільність розподілу визначається, як $p = dP / dd$ [3], звідки

$$p_i = \int_{d_{i+1}}^{d_i} p(\delta) d\delta = P(d_i) - P(d_{i+1}). \quad (2)$$

На рис. 2 наведено характеристики крупності матеріалу, що визначаються розподілом Розіна-Рамлера.

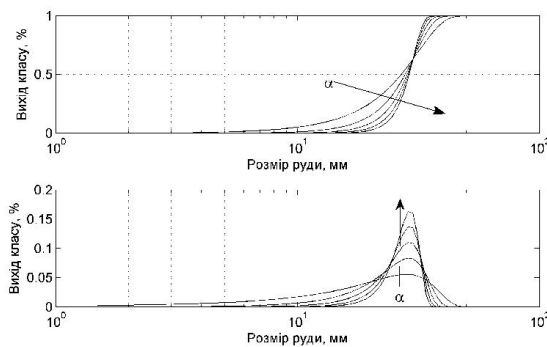


Рис. 2. Характеристики крупності матеріалу

Максимальна крупність складає $d_0 = 75$ мм, розмір на який приходить 63% руди дорівнює $d_{63} = 30$ мм.

Як видно з приведених залежностей параметр α впливає на кут нахилу кривої розподілу.

Умовно розділимо камеру дроблення на N послідовних зон, де відбувається руйнування матеріалу. Кожна зона характеризується власними граничними розмірами крупності вхідного і вихідного продукту, тобто в i -ту зону не може

потрапити матеріал з класом крупності більше її вхідного розміру, а також зону не може покинути руда, що не була зменшена до необхідної величини.

Для описання процесу дроблення у статичному режимі для кожної зони прийемо за основу матричне рівняння наведено у [6]

$$P_i = F_i + [B_i \cdot S_i + (I - S_i)] \cdot [M_i - M_i (I - C_i)], \quad (3)$$

де F_i, M_i , і P_i - вектори розподілу за класами крупності, відповідно, мас живлення, матеріалу, що залишається у дробарці і продукту процесу дроблення, кг або т; C_i, B_i і S_i - матриці класифікації, руйнування і відбору; I - одинична матриця розміру n .

Відповідно до рівняння (3), функціонування конусної дробарки складається з комбінації трьох основних операцій - відбору, руйнування і класифікації, які постійно повторюються під час роботи агрегату. Кожна з цих операцій може бути описана безперервною функцією або у матричному вигляді.

Функція класифікація представляє частку матеріалу, який має достатньо велику крупність для руху вниз по камері дроблення. У матричному вигляді функція класифікації являє собою діагональну матрицю

$$C_i = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & c_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де c_i - доля матеріалу i -го класу крупності, яка не здійснює рух по камері дроблення.

Елементи матриці C визначаються відповідно до виразу запропонованому у [5]

$$c_i = \begin{cases} 0, & \text{якщо } d_i < d_1, \\ \left(1 - \frac{d_i - d_2}{d_1 - d_2}\right)^n, & \text{якщо } d_1 < d_i < d_2, \\ 1, & \text{якщо } d_i \geq d_2. \end{cases} \quad (5)$$

де d_1 - параметр, який визначає найменший розмір часток руди, що залишаються в зоні дроблення у відкритій фазі циклу дроблення, м; d_2 - параметр, що визначає найбільший розмір часток руди, які можуть рухатися вниз через зону дроблення, м; n - числовий коефіцієнт.

Як зазначено у [5] параметри d_1 і d_2 пропорційні ширині розвантажувальної щілини, тому з урахуванням профілю камери дроблення [3] вони розраховуються за наступними формулами:

$$d_1 = \alpha_1 l; \quad d_2 = \alpha_2 l + d^*; \quad l = l_0 + u, \quad (6)$$

де α_1, α_2, d^* - параметри функції класифікації, u - ширина розвантажувальної щілини, l - ширина камери дроблення, l_0 - ширина камери дроблення при $u = 0$.

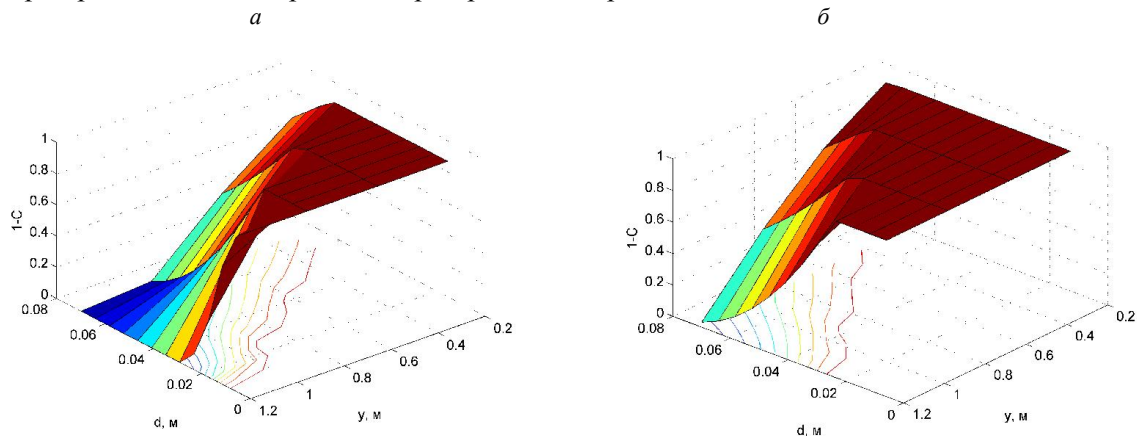


Рис. 3. Залежність функції класифікації від розміру руди і довжини камери дроблення при $a - u = 15$ мм, $b - u = 40$ мм

Функція руйнування демонструє долю часток матеріалу у межах розмірів $D_1 = (d_1, d_1 + \Delta d_1)$, які входять в інтервал часток з розмірами між $D = (d, d + \Delta d)$ після однієї операції руйнування [3]. У матричній формі матриця руйнування може бути представлена сумою двох складових [6]

$$B = \alpha B_1 + (1 - \alpha) B_2, \quad (7)$$

Кожна складова матриці B являє собою нижню трикутну матрицю, сума елементів кожного стовпця якої дорівнює одиниці

$$B_i = \begin{bmatrix} b_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ b_{n,1} & \dots & b_{n,n-1} & b_{n,n} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

Елементи матриць B_1 і B_2 розраховуються з використанням виразу [5], який визначає долю часток руди розміру менше x , що отримуються в результаті руйнування однієї частки матеріалу розміру y

$$B(x, y) = K \left(\frac{x}{y} \right)^{n_1} + (1 - K) \left(\frac{x}{y} \right)^{n_2}, \quad (9)$$

де K, n_1, n_2 - параметри, що характеризують матеріал.

Слід відзначити, що розрахунок елементів матриці B необхідно здійснювати з урахуванням міцності руди [10]. Для спрощення вважаємо, що параметри K, n_1, n_2 лінійно залежать від γ .

Використовуючи формулу (9) отримуємо вираз для обчислення елементів матриці B

$$b_{i,j} = B(d_i, d_j) - B(d_{i+1}, d_j). \quad (10)$$

Параметр α визначається з урахування ширини щілини дробарки [6]

$$\alpha = 0,872 + 0,0045 \cdot u. \quad (11)$$

Функція відбору визначає ймовірність руйнування часток окремого класу крупності. У матричному вигляді матриця відбору, так само як і матриця класифікації представляється діагональною матрицею

$$S_i = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & s_n \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де s_i - доля матеріалу i -го класу крупності, яка відбирається для руйнування.

Для визначення складових матриці S використовується вираз запропонований у роботі [7]

$$s = s_0 d^a, \quad (13)$$

де s_0, a - параметри. Значення параметру s_0 залежить від ширини розвантажувальної щілини і профілю камери дроблення (рис. 4).

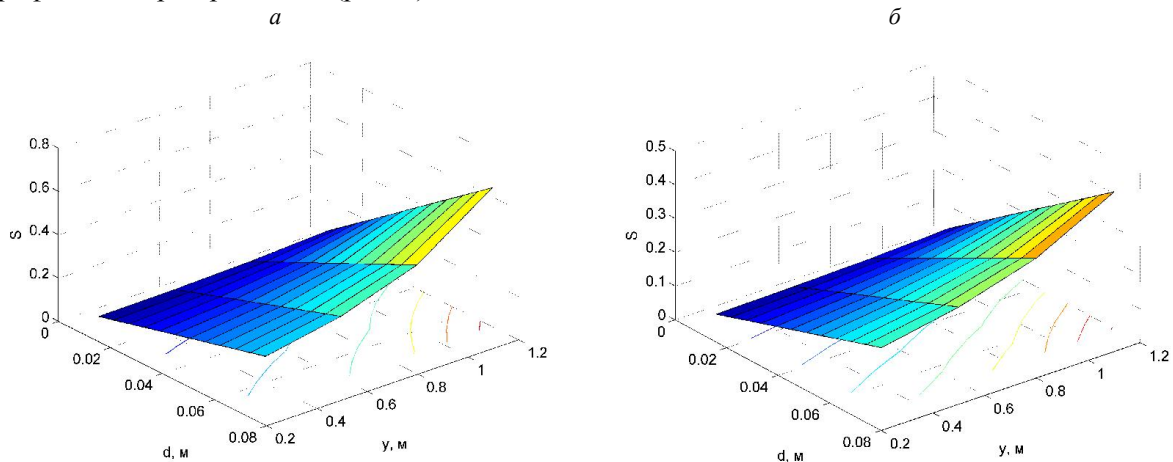


Рис. 4. Залежність функції відбору від розміру руди і довжини камери дроблення при $a - u=15$ мм, $b - u=40$ мм

У процесі експлуатації на дробарку впливають фактори, які не піддаються контролю. До них відносять розподіл вхідного матеріалу за крупністю, фізико-механічні властивості матеріалу (міцність, вологість) і ін. Так як розглядаються конусні дробарки дрібного дроблення припустимо, що розмір матеріалу, який надходить до агрегату має стабільний розподіл по крупності. Відповідно до результатів дослідження [9] на продуктивність значно впливає міцність продукту. Враховуючи, що у межах однієї поставки руди з кар'єру міцність усього матеріалу практично однакова [1] скористаємося статичною моделлю ідеального змішування

$$\gamma_i = \gamma_{i-1}, \quad (14)$$

де γ_{i-1} - міцність руди, яка надходить у зону.

Враховуючи велику довжину камери дроблення порівняно з розмірами дробленого матеріалу, не весь продукт класифікації може покинути робочу зону. Аналіз переміщення часток по камері дроблення [8] показав, що під час роботи технологічного агрегату матеріал одночасно може падати і ковзати вниз. У роботі [4] введено поняття фактору переміщення матеріалу по зоні дроблення, який визначає частку матеріалу з продукту класифікації, що переміститься на вхід наступної зони або залишить камеру дроблення

$$v_i = g\tau^2 / 2\omega^2 L_i, \quad (15)$$

де g - прискорення вільного падіння, m/c^2 ; τ - параметр, що визначає час протягом якого матеріал вільно падає вниз по камері дроблення, ω - швидкість обертання ексцентрики, c^{-1} ; L - довжина робочої зони.

Параметр v виведено спираючись на припущення, що під час одного оберту ексцентрики є частина циклу коли матеріал затримується у зоні, а протягом часу, що залишився, вільно падає вниз.

Для розрахунку струму, який споживає електропривод дробарки з урахуванням того, що загальний ефект руйнування матеріалу пов'язаний з добутком матриці C_i на вектор M_i , тому що він не враховує руду, яка переміщується у наступну зону або залишає камеру дроблення [6].

Обчислення виконується за наступними виразами

$$I_i = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \gamma, \quad (16)$$

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{c_i m_i}{d_i + d_{i+1}}, \quad (17)$$

де c_i і m_i - елементи головної діагоналі матриці C_i та вектору M_i ; d_i і d_{i+1} - нижній та верхній розміри i -го класу крупності, м; a_i - параметри, які визначаються емпірично.

Також слід звернути увагу на те, що кожна зона руйнування володіє кінцевою ємністю, тобто існує максимальна маса руди $M_{\max i}$, яку зона може містити, тому необхідно відстежувати

умови її заповнення. Обмеження за об'ємом є функцією геометричних розмірів камери дроблення і ширини розвантажувальної щілини. Відповідно до припущення наведеного у [4] при відносно постійній щільності матеріалу обмеження за об'ємом можна перевести у обмеження за масовою продуктивністю

$$\sum_{j=1}^n m_j \leq \sum_{j=1}^n (f_j^i + r_j^i), \quad (18)$$

де m_i, f_i і r_i - елементи векторів M_i, F_i та R_i .

У [4] запропоновано використовувати вираз для контролю заповнення відповідної зони

$$\mu_i = \min \left(\frac{M_{\max i} - \sum_{j=1}^n r_j^i}{\sum_{j=1}^n p_j^{i-1}} \right) \quad (19)$$

З використанням виразів (3-19) було розроблено імітаційну модель конусної дробарки у середовищі MATLAB/Simulink (рис. 5). Камера дроблення розділена на чотири зони. Загальна довжина камери складає 1,2 м. Кожна зона має однакову довжину, яка дорівнює 0,3 м.

Ширина розвантажувальної щілини змінювалася з 20 до 40 мм. Швидкість обертання ексцентрики змінювалася у межах 5÷15 об/с. Як вже зазначалося міцність руди впливає на значення елементів матриці руйнування, тому для спрощення розрахунків було прийнято, що параметри матриць B_1 і B_2 визначаються відповідно до наступних лінійних залежностей

$$K = -0,0839\gamma + 0,8469,$$

$$n_1 = 0,5857\gamma - 2,2351,$$

$$n_2 = 1,3796\gamma - 4,0566.$$

Для представлення замкнутого циклу дроблення, на виході агрегату встановлено елемент Screen (рис. 5), що моделює роботу ідеального гуркоти. Весь вихідний матеріал, що перевищує розмір 20 мм повертається на вхід для повторного дроблення. Блок Bin через який відбувається живлення дробарки являє собою модель бункера з обмеженою місткістю, який повністю заповнюється рудою, що повинна пройти повторне руйнування і доповнюється матеріалом, що поступає на вхід з попередньої стадії з урахуванням максимального об'єму ємності.

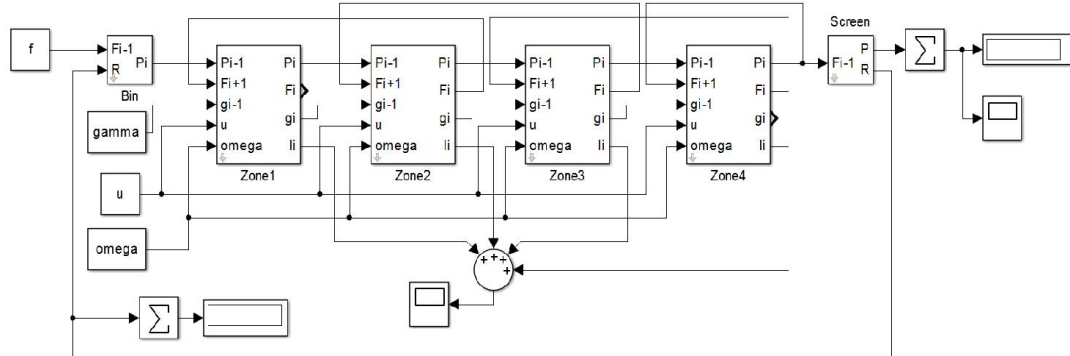


Рис. 5. Імітаційна модель замкнутого циклу дроблення

Результати обчислювального експерименту дозволили виділити деякі особливості роботи розробленої моделі. На рис. 6 наведено статичні характеристики конусної дробарки. Встановлено, що характеристики мають один чіткий максимум в області зміни керуючих дій (табл. 1).

Таблиця 1

Положення оптимуму продуктивності при зміні міцності руди, швидкості обертання робочого органу і ширини щілини дробарки

Міцність, γ	Швидкість обертання ексцентрика, ω [об/с]	Ширина щілини, u [мм]	Продуктивність, [кг/с]
5,5	9,5	24	90,71
6	9,8	26	85,35
6,5	9,9	25	81,06

При цьому оптимум дрейфує при зміні міцності руди. Так при зміні γ на 16 % від 5,5 до 6,5

одиниць продуктивність знижується на 11 % від 90,71 до 81,06 кг/с. Слід відзначити, що зміщення максимуму продуктивності відбувається вертикально, тобто положення оптимуму знаходиться в точці з практично однаковою комбінацією вхідних дій ω і u .

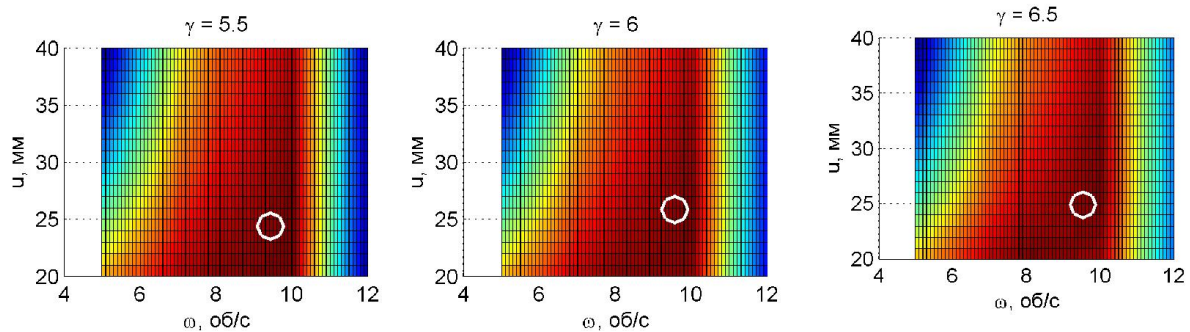


Рис. 6. Статичні характеристики конусної дробарки

Така поведінка об'єкту обумовлюється наявністю критичної маси для агрегату після досягнення якої відбувається зниження продуктивності в замкнутих циклах дроблення, що підтверджують промислові випробування описані у [12] і дослідження [4].

Висновки. Удосконалено математичну модель конусної дробарки з розділенням камери дроблення на зони.

Виконано аналіз впливу фізико-механічних властивостей вхідного матеріалу на режими функціонування агрегату.

Встановлено, що статична характеристика, яка відображає зміну продуктивності технологічного об'єкту при різних значеннях швидкості обертання ексцентрики і ширини розвантажувальної щілини, має один максимум в області зміни керуючих дій.

При збільшенні значення міцності руди відбувається зміщення положення оптимуму вниз.

Розроблена модель також враховує витрати електроенергії на дроблення.

Питання пов'язані з аналізом впливу режимів роботи конусної дробарки на енергетичні характеристики не були розглянуті у представленій роботі, а є метою подальших досліджень.

Список літератури

1. Автоматизация управления обогатительными фабриками ; под ред. **Кошарского Б.Д.**, Ситковский А.Я., Красномовец А.В. – М.: Недра, 1977. – 527с.
2. **Whiten W.** The simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression / W. Whiten // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. - Vol. 72, No. 10. - 1972 - pp. 257-264.
3. **Johansson A.** Modeling and simulation of cone crushers / A. Johansson // IFACMMM 2009 Workshop on Automation in Mining, Mineral and Metal Industry, 2009.
4. **Khalid T. Atta.** Modelling and on-line optimization of cone crushers: licentiate thesis / Khalid T. Atta. - Universitetsstryckeriet, Lulea, 2013. - ISBN 978-91-7439-674-4.
5. **King R.P.** Modeling and simulation of mineral processing systems / R.P. King. – London: Elsevier, 2001. – 403 p. - ISBN 0-7506-4884-8.
6. **Линч А.Дж.** Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление / А.Дж. Линч ; пер. с англ. – М.: Недра, 1981. – 343 с.
7. **Kapur P.** The energy-size reduction relationships in comminution of solids / P. Kapur // Chemical Engineering Science. - Vol. 26, No. 1. – 1971. - pp. 11-16. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0009250971860761>
8. **Evertsson C.** Modelling of flow in cone crushers / C. Evertsson // Minerals engineering. - Vol. 12, No. 12. - pp. 1479-1499.
9. **Sbarbaro D.** Advanced control and supervision of mineral processing plants / D. Sbarbaro, Rene del Villar.- London: Springer, 2010. - 310 p. - ISBN 978-1-84996-106-6.
10. **Nair P.R.** Material characteristics and the breakage parameters in a circular fluid energy mill / **P.R. Nair** // Advanced Powder Technology. - Vol. 10, No. 1. - 1999. - pp. 21-36. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921883108604549>
11. **Ибрагим Б.Х.** Автоматизация процессов вторичного дробления конусной дробилки по стоимостному критерию: дис... канд. техн. наук: 05.13.06 / **Ибрагим Басим Халлилович.** - М., 2006. – 155 с.
12. **Тихонов О.Н.** Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках: [Учебн. для вузов] / **О.Н. Тихонов.** - М.: Недра, 1985. - 272 с.

Рукопис подано до редакції 23.03.13