

УДК 622(06)

**М.І. СОКУР**, д-р техн. наук,

**Д.П. БОЖИК**

(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського),

**В.С. БІЛЕЦЬКИЙ**, д-р техн. наук

(Україна, Харків, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"),

**С.О. УЧИТЕЛЬ**

(Україна, Дніпро, Національна металургійна академія України)

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КІНЕТИКИ ДРОБЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ У ВІДЦЕНТРОВО-УДАРНІЙ ДРОБАРЦІ

### *Постановка проблеми та стан її дослідження*

Основним елементом відцентрово-ударної дробарки (ВУД) є ротор, розташований на вертикальному валу. Ротор забезпечений розгінними елементами (ребра, лопаті, канали тощо). Матеріал, який підлягає дробленню, подається в центральну частину ротора, прискорюється розгінними елементами і з високою швидкістю викидається на відбивні поверхні, розташовані на периферії камери дроблення, де руйнується при ударі.

Розглядаючи типи подрібнювачів ударної дії, Х. Уемис [1] вказує, що тут можливі три основних механізми руйнування шматка матеріалу. Залежно від конструкції і принципу дії машини, має місце: (а) зіткнення з перешкодою, (б) взаємне зіткнення шматків між собою або (с) зіткнення з рухомим робочим елементом.

Робочий процес роторної або молоткової дробарки протікає, переважно, за механізмом (с): відомо, що в цих апаратах дроблення відбувається здебільшого при контакті з молотком або биллом.

Основна відмінність ВУД від інших дробарок ударної дії полягає в тому, що акт дроблення практично повністю переміщений з обертового робочого органу на периферійну відбивну поверхню. Ротор при цьому виконує тільки розгінну функцію. Практично траєкторії частинок в робочій камері дробарки можуть бути дуже різні, при цьому мають місце всі вищевказані механізми руйнування, але руйнування типу (а) – ударом об перешкоду – превалює.

Техніка і технологія відцентрово-ударного дроблення описана і досліджується в ряді робіт [1-9].

Так, в роботах [6, 7] розглядаються питання дезінтеграції металургійних шлаків в апаратах відцентрово-ударного дроблення. Представлена модель руйнування шматка матеріалу в камері відцентрово-ударної дробарки. Розроблено схему силової взаємодії шматка шлаку і плити камери дробарки з урахуванням розподіленого характеру інерційних навантажень. Встановлено взаємозв'язок конструктивних параметрів апарату і технологічних властивостей дробленого матеріалу, отримана залежність швидкості шматка матеріалу від його фізико-механічних характеристик. Пропонується вибір оптимальної швидкості обертання прискорювача дробарки. Встановлено, що мінімально необхідна для руйнування шматка швидкість обертання прискорювача відцентрово-ударної дро-

барки і фізико-механічні характеристики шлаків пов'язані залежністю, до якої входять параметри: межа міцності при стисненні; модуль пружності; коефіцієнт Пуассона; маса шматка; радіус шматка, а також емпіричний коефіцієнт.

У роботі [8] для моделювання процесів у відцентрово-ударній дробарці застосовано метод дискретних елементів (DEM, від англ. Discrete element method) – метод розв'язання геомеханічних задач, який іноді називають молекулярною динамікою (MD), навіть коли частинки не є молекулами [9, 10]. Автори [8] аналізують різні ударні події між частинками та елементами подрібнювача та між частинками. Процес руйнування у відцентрово-ударних подрібнювачах (аналог фрезерування) може бути використаний у багатьох промислових секторах для скорочення розмірів частинок. Хоча він відомий давно, але вважався неефективним з точки зору споживання енергії і його оптимізація залишається дуже складною, в основному завдяки відсутності наукового розуміння комплексу механізмів руйнування матеріалу. Показано, що процес руйнування у відцентрово-ударних подрібнювачах дуже чутливий до характеру режиму напружень і швидкості деформації, накладеної на частинки в млині (дробарці). Виконано чисельне дослідження дроблення з використанням методу DEM для оцінки впливу напруги на результати операції "ударного шліфування". Крім того, одержані результати використовуються для встановлення матеріаломісткості апарата в контексті забезпечення необхідних напруг в робочій зоні руйнування матеріалу.

У [11, 12] показано, що ударні подрібнювачі належать до найбільш часто застосовуваних на сучасних фабриках для тонкого та дрібного дроблення (подрібнення). Їх різні механічні конструкції дозволяють враховувати особливості дробимого матеріалу. Типові ВУД включають швидкісні обертові диски, молот. Матеріал утворює осьовий і кільцевий потік. Обертові диски дробарки мають шпильки або леза на кожному диску, які обертаються на високих швидкостях до близько 150 м/с. Цим забезпечується багаторазовий ударний вплив на дробимий матеріал. Подрібнювач моделювався за допомогою методу ДЕМ, який широко визнаний як придатний інструмент для моделювання матеріалів, таких як породи, ґрунти та мінеральні руди [13]. Симуляції були виконані за припущення вакуумного стану середовища та жорстких частинок.

Разом з тим, огляд і аналіз досліджень і публікацій з тематики відцентрово-ударного дроблення (подрібнення) показує брак досліджень з математичного моделювання кінетики процесу руйнування матеріалу в ударно-відцентрових подрібнювачах, що необхідно для їх технологічних розрахунків.

*Мета роботи* – розробка математичної моделі для розрахунку кінетичних параметрів руху матеріалу у зоні розгінного ротора відцентрово-ударної дробарки, а також одержання вихідних даних для розрахунків продуктивності, споживаної потужності, оцінки зносу розгінних елементів ротора дробарки.

*Основний виклад матеріалу.* Феноменологічний аналіз [14] процесу дроблення у ВУД дозволяє розділити розглянутий процес на кілька основних під процесів (субпроцесів), що протікають на робочому органі і в камері дроблення:

- завантаження матеріалу, що переробляється в завантажувальну зону ротора;
- переміщення матеріалу в завантажувальній зоні до контакту з розгінними поверхнями ("розподіл");
- переміщення матеріалу в розгінній зоні ротора ("розгін");
- виліт матеріалу з ротора і політ до контакту з відбивною поверхнею ("політ");
- руйнування частинок матеріалу на відбивній поверхні ("дроблення");
- розвантаження продукту.

Розбиття процесу дроблення в ВУД на вказані підпроцеси обумовлено особливостями геометрії робочої камери ВУД і, відповідно, різною природою сил, що впливають на матеріал в кожному випадку. Так, зокрема, завантаження і розвантаження ВУД є практично чисто гравітаційними, в той час як субпроцеси "розподілу" і "розгону" відбуваються в інтенсивному відцентровому полі. Основною цільовою функцією при ударному дробленні прийнято вважати швидкість удару, яка обумовлює гранулометричний склад продукту на етапі субпроцесу "дроблення". Завдання оптимізації для ВУД: досягнення максимальної швидкості вильоту в заданих габаритах, при максимальній продуктивності, мінімальній споживаній потужності і мінімальному зношуванню робочих поверхонь. Однак, особливістю робочого процесу ВУД є неадитивність його вищенаведених субпроцесів. Тому досягнення максимальних значень цільових функцій в кожному з них не призводить до досягнення максимуму цільових функцій процесу дроблення. Це викликає необхідність пошуку раціональних параметрів таких дробарок на основі багатокомпонентної математичної моделі.

У цій статті розглядається математична модель субпроцесу "розподілу" технологічного навантаження на робочому органі ВУД. Фізичним змістом даного процесу є переміщення матеріалу в завантажувальній зоні до контакту з розгінними поверхнями, а саме – розгін частинок дробимого матеріалу по шорсткій поверхні обертового диска. При цьому припускається, що рух частинки відбувається без втрати контакту з поверхнею розгону.

### *1. Основне рівняння і початкові умови.*

Ротор ВУД обертається з постійною кутовою швидкістю  $\omega_e$  (переносна кутова швидкість). Введемо пов'язану з диском полярну систему координат з полюсом  $O_1$ , що збігається з віссю обертання (рис. 1).

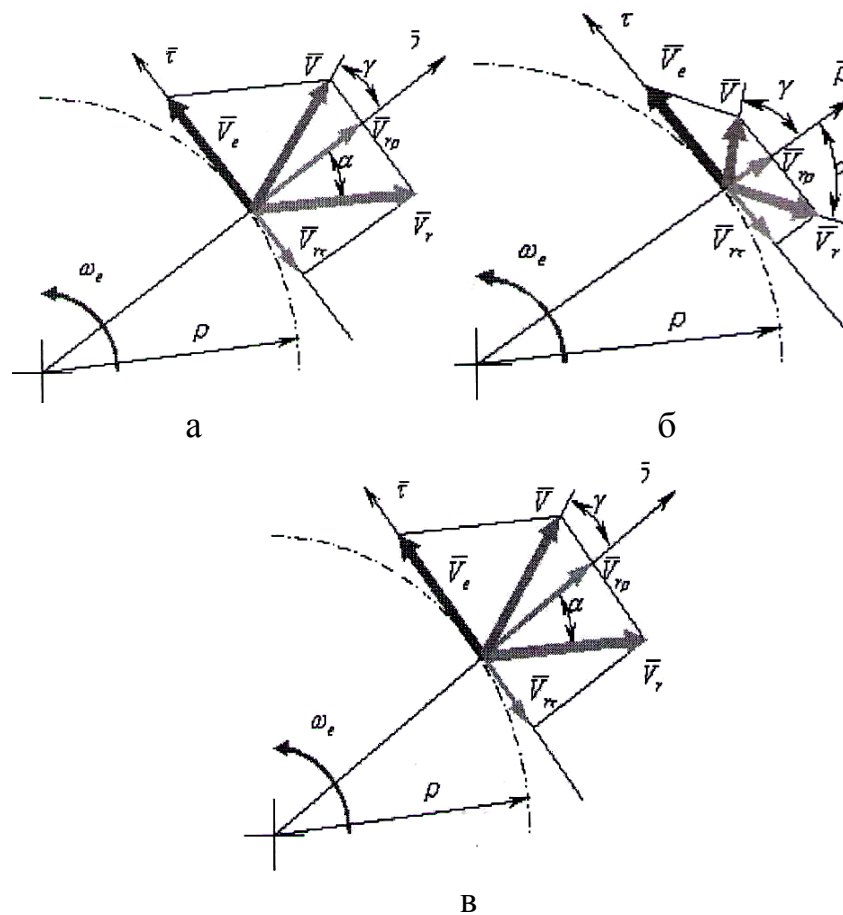


Рис. 1. Розрахункові схеми швидкостей одиничної частинки:  
 а – в початковий момент часу (при  $t = 0$ ); б – при  $t \neq 0$ ; в – при  $t \gg 0$

Контакт частинок з поверхнею диска відбувається на початковому радіусі  $\rho_0$  при початковій радіальній швидкості руху  $v_{\rho 0}$ , початковій коловій (дотичній) швидкості абсолютного руху  $v_{\tau 0}$ .

Рух частинки, яку приймаємо за матеріальну точку, описується основним рівнянням динаміки:

$$m\bar{a} = \bar{F}_{mp}, \quad (1)$$

де  $m$  – маса частинки,  $\bar{a}$  – вектор її абсолютного прискорення;  $\bar{F}_{mp} = \overline{mg}k_1$  – сила тертя;  $k_1$  – коефіцієнт тертя ковзання між частинкою і розгінним диском;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Частинка бере участь в складеному русі: разом з диском – переносному, безпосередньо по поверхні диска – відносному і щодо землі – абсолютному. Прискорення, набуті частинкою в цих рухах, позначимо відповідно

$$\bar{a}_a + \bar{a}_r + \bar{a}_c = \overline{k_1 g}, \quad (2)$$

де  $\bar{a}_c$  – прискорення Коріоліса.

Рух частинки від початкового стану і закінчуючи досить віддаленим у часі моментом, показано на рис. 1.

Момент початку руху показаний на рис. 1а ( $t = 0$ ). Завантажувальна швидкість частинки в радіальному напрямку визначає початкову абсолютну радіальну швидкість частинки  $v_{\rho 0}$ . Завантажувальна швидкість частинки в коловому напрямку визначає початкову абсолютну колову швидкість частинки  $v_{\tau 0}$ . Ці швидкості відомі за умовами завантаження.

Переносна початкова швидкість частинки становить:

$$v_{e0} = \omega_e \rho_0. \quad (3)$$

Відносна швидкість ковзання по диску в цей початковий момент максимальна. Відповідно до теореми про складання швидкостей в складеному русі маємо:

$$\bar{v}_0 = \bar{v}_{e0} + \bar{v}_{r0}. \quad (4)$$

В проекціях на радіальний і коловий напрямки з урахуванням  $v_{e\tau 0} = v_{e0} - \omega_e \rho_0$ ,  $v_{e\rho 0} = 0$ , рівняння (5) набуває вигляду:

$$\begin{cases} v_{\tau 0} = \omega_e \rho_0 + v_{r\rho 0} \\ v_{\rho 0} = v_{r\rho 0} \end{cases} \quad (5)$$

З цієї системи рівнянь визначаємо величину складової початкової відносної швидкості руху частинки по диску

$$\begin{cases} v_{r\tau 0} = v_{\tau 0} - \omega_e \rho_0 \\ v_{r\rho 0} = v_{\rho 0} \end{cases} \quad (6)$$

де  $v_{r\rho 0}$  – початкова відносна радіальна швидкість частинки;  $v_{r\tau 0}$  – початкова відносна колова швидкість частинки.

Таким чином, всі початкові швидкості точки відомі.

У наступні моменти часу картина розподілу швидкостей частинки змінюється відповідно до рис. 1б, 1в.

Кут  $\alpha$ , утворений вектором відносної швидкості  $\bar{v}_r$  і радіус-вектором частинки, на початку руху набуває максимального значення, яке становить:

$$\alpha_0 = \arctg \frac{v_{r\tau 0}}{v_{\rho 0}} = \arctg \frac{v_{\tau 0} - \omega_e \rho_0}{v_{\rho 0}}. \quad (7)$$

Далі розглянемо набуті точкою початкові прискорення (рис. 2а). Зміна картини прискорень точки в даному процесі показана на рис. 2б.

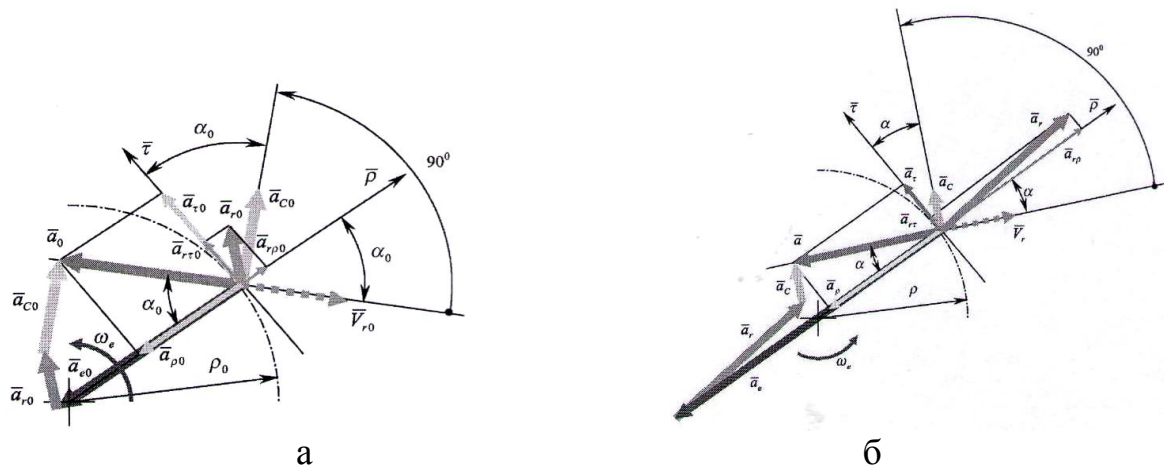


Рис. 2. Розрахункові схеми прискорень одиничної частинки:  
 а – в початковий момент часу (при  $t = 0$ ); б – при  $t \gg 0$

Початкове абсолютне радіальне прискорення становить

$$a_{\rho 0} = -\alpha \cos \alpha_0 = -k_1 g \cos \alpha_0. \quad (8)$$

Початкове абсолютне колове прискорення тоді складе

$$a_{\tau 0} = \alpha \sin \alpha_0 = k_1 g \sin \alpha_0. \quad (9)$$

Початкове переносне прискорення визначається тільки відцентровим прискоренням частинки, тому

$$a_{e0} = a_{e\rho 0} = -\omega_e^2 \rho_0. \quad (10)$$

Модуль вектора початкового прискорення Коріоліса з урахуванням

$$v_{r0} = \sqrt{v_{r\tau 0}^2 + v_{\tau\rho 0}^2} = \sqrt{(v_{r0} - \omega_e \rho_0)^2 + v_{\rho 0}^2}$$

складе:

$$|a_{c0}| = 2\omega_e \sqrt{(v_{\tau 0} - \omega_e \rho_0)^2 + v_{\rho 0}^2}, \quad (11)$$

а його складові по радіальному і коловому напрямкам відповідно:

$$\begin{cases} a_{c\rho 0} = a_{c0} \sin \alpha_0 \\ a_{c\tau 0} = a_{c0} \cos \alpha_0. \end{cases} \quad (12)$$

Відповідно до теореми про додавання прискорень (теорема Кориоліса)

$$\bar{a}_0 = \bar{a}_{e0} + \bar{a}_{r0} + \bar{a}_{c0}. \quad (13)$$

Або, після перетворень, в проекціях на радіальний і коловий напрямки:

$$\begin{cases} a_{\rho 0} = \omega_e^2 \rho_0 - k_1 g \cos \alpha_0 - a_{c0} \sin \alpha_0 \\ a_{r\tau 0} = k_1 g \sin \alpha_0 - a_{c0} \cos \alpha_0. \end{cases} \quad (14)$$

Таким чином, початкові параметри руху частинки повністю визначені.

### 2. Рівняння руху

Переходячи від векторної форми рівняння (3) до проекцій, маємо:

$$\begin{cases} a_{e\rho} + a_{r\rho} + a_{c\rho} = a_\rho \\ a_{e\tau} + a_{r\tau} + a_{c\tau} = a_\tau. \end{cases} \quad (15)$$

Далі, з урахуванням  $a_\rho = -k_1 g \cos \alpha$ ;  $a_\tau = -k_1 g \sin \alpha$ ;  $a_{e\rho} = -\omega_e^2 \rho$ ;  $a_{e\tau} = 0$ ;  $a_{c\rho} = 2\omega_e v_{r\tau}$ ;  $a_{c\tau} = 2\omega_e v_{r\rho}$ ;  $a_{r\rho} = v_{r\rho}$ ;  $a_{r\tau} = v_{r\tau}$  одержуємо:

$$\begin{cases} -\omega_e^2 \rho + v_{r\rho} + 2\omega_e v_{r\tau} = -k_1 g \cos \alpha \\ v_{r\tau} + 2\omega_e v_{r\rho} = k_1 g \sin \alpha. \end{cases} \quad (16)$$

Система диференціальних рівнянь (16) являє собою шуканий закон руху. Рішення її має певні труднощі через наявність змінної функції кута  $\alpha$  в часі [1].

### 3. Рішення рівнянь руху

Розглянемо процес зміни в часі кута  $\alpha$ . Його початкове (найбільше) значення становить  $\alpha_0$ . Далі необхідно зазначити, що в процесі руху  $\bar{\omega}_e \neq 0$ ,  $\bar{v}_k \neq 0$ , і, отже, прискорення Коріоліса не може приймати нульове значення. Крім цього, вектор  $\bar{a}_r$  не може бути направлений проти дії сили тертя, тобто завжди  $a_{r\tau} > 0$ . Припущення, що  $\alpha = 0$  або  $\alpha \rightarrow 0$  означало б, що  $a_{r\tau} + a_{c\tau} = 0$ , що неможливо. Звідси випливає, що кут  $\alpha$  після початку руху починає зменшуватися і через деякий час, досягаючи граничної (мінімальної) величини, залишається постійним. У геометричному сенсі це дозволяє визначити траєкторію частинок на "розподільній" ділянці ротора ВУД як фрагмент логарифмічної спіралі. Це дозволяє перейти до вирішення рівнянь (16) у сталому, по зміні кута  $\alpha$ , режимі руху.

Диференціюючи обидва рівняння системи (16) з урахуванням  $\omega_e = Const$ ;  $k_1 g \cos \alpha = Const$ ;  $k_1 g \sin \alpha = Const$ , одержимо

$$\begin{cases} -\omega_e^2 \rho + v_{r\rho} + 2\omega_e \dot{v}_{r\tau} = 0 \\ \ddot{v}_{r\tau} + 2\omega_e \dot{v}_{r\rho} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

При цьому  $\dot{\rho} = m_{r\rho}$ . Тоді

$$\begin{cases} -\omega_e^2 v_{r\rho} + \ddot{v}_{r\rho} + 2\omega_e \dot{v}_{r\tau} = 0 \\ \ddot{v}_{r\tau} + 2\omega_e \dot{v}_{r\rho} = 0. \end{cases} \quad (18)$$

З першого рівняння (18) витікає:

$$v_{r\rho} = \frac{1}{\omega_e^2} (\ddot{v}_{r\rho} + 2\omega_e \dot{v}_{r\tau}). \quad (19)$$

Похідна одержаної функції швидкості:

$$v_{r\rho} = \frac{1}{\omega_e^2} (\ddot{v}_{r\rho} + 2\omega_e \ddot{v}_{r\tau}). \quad (20)$$

Враховуючи  $\ddot{v}_{r\tau} = -2\omega_e \dot{v}_{r\rho}$ , і приводячи до канонічного вигляду, знаходимо кінцеву формулу:

$$v_{r\rho} - 5\omega_e^2 v_{r\rho} = 0. \quad (21)$$

Рівняння (21) – лінійне однорідне диференціальне рівняння з постійними коефіцієнтами.

Опускаючи техніку рішення, наводимо зведення результатів.

$$v_{r\rho} = C_1 + C_2 e^{\omega_e \sqrt{5}t} + C_3 e^{-\omega_e \sqrt{5}t}, \quad (22)$$

$$\dot{v}_{r\rho} = \omega_e \sqrt{5} C_2 e^{\omega_e \sqrt{5}t} - \omega_e \sqrt{5} C_3 e^{-\omega_e \sqrt{5}t}, \quad (23)$$

$$\dot{v}_{r\tau} = \frac{1}{2} \omega_e C_1 - 2\omega_e C_2 e^{\omega_e \sqrt{5}t} - 2\omega_e C_3 e^{-\omega_e \sqrt{5}t}, \quad (24)$$

$$\dot{v}_{r\tau} = \frac{1}{2} \omega_e C_1 t - \frac{2}{\sqrt{5}} C_2 e^{\omega_e \sqrt{5}t} + \frac{2}{\sqrt{5}} C_3 e^{-\omega_e \sqrt{5}t} + C_4, \quad (25)$$

$$\rho = C_1 t + \frac{1}{\omega_e \sqrt{5}} C_2 e^{\omega_e \sqrt{5}t} - \frac{1}{\omega_e \sqrt{5}} C_3 e^{-\omega_e \sqrt{5}t} + C_5, \quad (26)$$

$$C_1 = \frac{4}{5} v_{\rho 0} + \frac{2 k_1 g}{5 \omega_e} \sin \alpha_0 - \frac{2 a_{c0}}{5 \omega_e} \cos \alpha_0, \quad (27)$$

$$C_2 = \frac{1}{10} v_{\rho 0} + \frac{\omega_e \rho_0}{2\sqrt{5}} - \frac{k_1 g}{\omega_e} \left( \frac{\cos \alpha_0}{2\sqrt{5}} + \frac{\sin \alpha_0}{5} \right) - \frac{a_{c0}}{\omega_e} \left( \frac{\sin \alpha_0}{2\sqrt{5}} - \frac{\cos \alpha_0}{5} \right), \quad (28)$$

$$C_3 = \frac{1}{10} v_{\rho 0} - \frac{\omega_e \rho_0}{2\sqrt{5}} - \frac{k_1 g}{\omega_e} \left( \frac{\sin \alpha_0}{5} - \frac{\cos \alpha_0}{2\sqrt{5}} \right) + \frac{a_{c0}}{\omega_e} \left( \frac{\sin \alpha_0}{2\sqrt{5}} + \frac{\cos \alpha_0}{5} \right), \quad (29)$$

$$C_4 = v_{\tau 0} - \frac{3}{5} \omega_e \rho_0 - \frac{2 k_1 g}{5 \omega_e} \cos \alpha_0 - \frac{2 a_{c0}}{5 \omega_e} \sin \alpha_0, \quad (30)$$

$$C_5 = \frac{4}{5} \rho_0 + \frac{k_1 g}{5 \omega_e^2} \cos \alpha_0 + \frac{a_{c0}}{5 \omega_e^2} \sin \alpha_0. \quad (31)$$



### Висновок

1. Запропонована модель дозволяє визначити кінетичні параметри руху матеріалу в зоні субпроцесу "розподілу" відцентрово-ударного дроблення. Фізичним змістом даного субпроцесу є переміщення матеріалу в завантажувальній зоні до контакту з розгінними поверхнями, а саме – розгін частинок дробимого матеріалу по шорсткій поверхні обертового диска.

2. Практичне використання результатів включає розрахунок продуктивності і компонент споживаної потужності, оцінку зносу розгінних елементів ротора. Зазначені розрахунки є предметом наших наступних досліджень.

### Список літератури

1. Клейс И.Р., Ууэмыйс Х.Х. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия. – М.: Машиностроение, 1986. – 157 с.
2. Божик Д.П., Сокур М.І., Білецький В.С. Експериментальні дослідження виробництва будівельних матеріалів із застосуванням відцентрово-ударної дробарки // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 66(107). – С. 73-87.
3. Смирнов В.О., Білецький В.С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин: Навчальний посібник. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2012. – 284 с.
4. Підготовка корисних копалин до збагачення : Монографія / М.І. Сокур, В.С. Білецький, О.І. Єгурнов та ін. – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2017. – 392 с.
5. Учитель С.А., Замыцкий В.С., Лавлинский Н.П., Ильченко А.П. О движении частицы по горизонтально вращающемуся диску с шероховатой поверхностью. Деп. В УкрНИИТИ УК-84-Д, № 555, 1984.
6. I.V. Shadrinova, O.E. Gorlova, E.V. Kolodezhnaya, I.M. Kutlubayev. Metallurgical slag disintegration in centrifugal impact crushing machines. // Journal of Mining Science. March 2015, Volume 51, Issue 2, pp 363-368. <https://doi.org/10.1134/S1062739115020210>
7. Колодежная Е.В. Разработка технологии селективной дезинтеграции металлургических шлаков с использованием аппаратов центробежно-ударного дробления : диссертация кандидата технических наук : 25.00.13 / Колодежная Екатерина Владимировна; [Магнитог. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова]. – Магнитогорск, 2009. – 143 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/2441
8. C. Labra, J. Y. Ooi, J. F. Chen, and J. Sun. Numerical analysis of impact events in a centrifugal impact pin mill //Citation: AIP Conference Proceedings 1542, 935 (2013); doi: 10.1063/1.4812086 View online: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4812086> View Table of Contents: <http://aip.scitation.org/toc/apc/1542/1> Published by the American Institute of Physics.
9. Radjai, Farang; Dubois, Frédéric, eds. (2011). Discrete-element modeling of granular materials. London: Wiley-ISTE. ISBN 978-1-84821-260-2.
10. Griebel, Michael; et al. (2003). Numerische Simulation in der Moleküldynamik. Berlin: Springer. ISBN 3-540-41856-3.
11. T. Yokoyama, and Y. Inoue, "Chapter 10 Selection of Fine Grinding Mills," in Particle Breakage, edited by M. G. Agba D. Salman, and M. J. Hounslow, Elsevier Science B.V., 2007, vol. 12 of Handbook of Powder Technology, pp. 487-508.
12. Vogel, L. and W. Peukert. Breakage behaviour of different materials – construction of mastercurve for the breakage probability // Powder Technology. – 2003. –129. – P. 101-110.
13. Powell, M.S., McBride, A.T., 2006. What is required from DEM simulations to model breakage in mills. Minerals Engineering 19, 1013-1021.
14. Білецький В.С. Феноменологічний метод дослідження технологічних процесів у гірництві // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2013. – №2. – С. 149-152.

© Сокур М.І., Божик Д.П., Білецький В.С., Учитель С.О., 2017

Надійшла до редколегії 18.11.2017 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим