

12. MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b3. [Електронний ресурс]. – 2012. – Режим доступу: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf
13. ENC28J60 Data Sheet Microchip 1b3. [Електронний ресурс]. – 2004. – Режим доступу: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39662a.pdf>
14. CP2102/9 Data Sheet Silicon Labs. [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/CP2102-9.pdf>
15. Datasheet MAX481/MAX483/MAX485/MAX487–MAX491/MAX1487 Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers. [Електронний ресурс]. – 2014. – Режим доступу: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1487-MAX491.pdf>

Рукопис подано до редакції 08.04.2021

УДК 622.765

А.Ю. КРИВЕНКО, канд. техн. наук, ст. викл., Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук., проф.
Криворізький національний університет
Т.А. КРИВЕНКО, викл., Гірничий фаховий коледж КНУ

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ЗНЕШЛАМЛЕНІ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СУСПЕНЗІЇ

Мета. Дослідження питань гідравлічного збагачення залізорудної сировини в радіальних згущувачах типу МД9, а також розв'язок їх методами математичного моделювання.

Методи дослідження. Використання методів дослідження, таких як: теорії ймовірності, теорії інформації й побуди, математичного моделювання, загальноприйнятих законів гідравліки й гідродинаміки.

Наукова новизна. Дослідження потоку пульпи з живильного пристрою апарата, дозволяє одержати залежності швидкості руху потоку пульпи й вмісту твердого від параметрів пристрою подачі вихідного живлення. Отримані залежності дозволяють у значній мірі зменшити негативний вплив затопленого струменя на гідравлічне збагачення залізорудної сировини. Застосовуючи відомі закони гідродинаміки, була побудована математична модель гідравлічного поділу залізорудної сировини на виході з пристрою живлення апарата, відповідно до якої при виборі структури моделі використовуються теоретичні передумови. Розрахунковими формулами отримана залежність швидкості переміщення часток твердої фази потоку живлення пульпи від конструктивних особливостей радіального згущувача. Представлені залежності дозволяють варіювати необхідними параметрами процесу з урахуванням конструктивних особливостей апарата й пристрою подачі живлення, з метою одержання згущеного продукту заданої якості.

Практична значимість. Удосконалення технології збагачення залізних руд за рахунок підвищення ефективності гравітаційного збагачення в радіальних згущувачах типу МД9, у розробці нового способу формування вихідного живлення апарата.

Результати. Проведене математичне моделювання шляхом застосування теоретичної моделі гравітаційного гідравлічного поділу залізорудної сировини в радіальному згущувачі. У результаті цього отримані рівняння, які дозволили суттєво скоротити число параметрів, які впливають на протікання досліджуваного процесу. Обчислювальний експеримент, за результатами моделювання процесу гідравлічного гравітаційного поділу залізорудної сировини у радіальному згущувачі типу МД9, дозволив вивчити зміну відповідних параметрів і вплив їх на процес знешламлення. Як наслідок, на практиці виникають питання про знаходження кількісних співвідношень. Для рішення цих питань необхідно проведення експериментальних досліджень на рельєсних радіальних згущувачах, що функціонують, з метою збору матеріалу для оцінки величин параметрів, які входять у математичні моделі.

Ключові слова: дешламація, дешламація, МД9, радіальний згущувач.

doi: 10.31721/2306-5435-2021-1-109-106-111

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. На сучасних ГЗК досягти якісних показників сепарації рудної й породної складових при збагаченні руд неможливо без якісної підготовки дрібнених продуктів до магнітного збагачення. Для створення оптимальної умови для магнітного збагачення руди на ГЗК використовується дешламація рудної суспензії. Аналіз роботи знешламлюючих апаратів показав, що ефективність процесу поділу часток пульпи визначається параметрами, які залежать від властивостей матеріалу що поділяється, властивостей розділового середовища, конструкції й принципу дії застосовуваного апарату.

Підвищення якості магнетитових концентратів гірничо-збагачувальних комбінатів забезпечує їх значну конкурентоспроможність на внутрішньому й на зовнішньому ринках. Досягти це

можна за рахунок підвищення розділових характеристик процесу дешламації на різних етапах процесу збагачення руди.

Процес збагачення знешламлюючих апаратів ініціюється потоком вихідного живлення. Спадний потік вихідного живлення у прийомній ємності апарата обмежує приріст якісних показників пісків через збіг двох векторів. Вектора руху часток твердої фази й вектора гравітаційної складовій, який спрямований у низ. Таке формування вихідного живлення визначає неповний винос дрібних породних часток з нижньої частини апарата.

Аналіз досліджень і публікацій. Рішення проблеми підвищення якості збагачуваного продукту при знешламленні, в основному було зв'язано, зі зміною конструктивних особливостей самого збагачувального апарата, зміни температури пульпи, її щільності. Увага гідравлічним процесам усередині самого чана апарата, масопереносу рідин, сепараційним процесам приділялося недостатньо [1-3].

Постановка задачі. Сепараційні характеристики дешламатора перебувають у прямої залежності від масопереносу часток твердої фази у прийомній ємності апарата: конструктивні особливості, швидкість, напрямок вихідного живильного потоку, глибина розвантаження, швидкості висхідних потоків усередині чана апарата [4,5]. Отже, завданням досліджень є вивчення динаміки масопереносу часток твердої фази з урахуванням впливу зазначених факторів.

Одним з можливих шляхів дослідження поведінки часток в знешламлюючому апараті є математичне моделювання, застосовуючи яке можна буде вивчити поведінку частки в живильному потоці й самого живильного потоку в цілому на виході із пристрою подачі живлення, а також досліджувати особливості протікання операції знешламлення в широкому інформаційному діапазоні [6]. Такі дослідження дають можливість знайти оптимальні умови її проведення. Крім того, математична модель може бути включена як складений елемент в алгоритм керування процесом знешламлення.

Виклад матеріалу та результати. Ефективність процесу знешламлення підвищується при більш тривалій взаємодії часток вихідної сировини із двофазним середовищем у прийомній ємності апарата [7,8]. Зміна просторової орієнтації потоку живлення приводить до зміни траєкторії руху часток твердої фази [9,10]. Це обумовлює можливість виносу породних часток у злив, при цьому мінімізуючи можливість їх влучення в зону згущеного продукту, тим самим збільшуючи якість концентрату.

Після виходу потоку суспензії із горизонтального живильного пристрою, відбувається її рух до периферії згущувача. Струмінь суспензії вносить у навколишній простір чана апарата потік твердої фази. Відбувається поширення твердої фази та додання її компонентам певного прискорення. Потік живлення розбивається о навколишнє двофазне середовище й утворюється затоплений струмінь. Затоплений струмінь, що утворюється, поширюється по чану апарата. Він захоплює при цьому набагато більшу площу, ніж струмінь живлення при стандартноприйнятій подачі – вертикальній зі спадним живленням [4]. Таким чином, час знаходження часток у зоні поділу апарата буде більше у порівнянні зі спадною подачею вихідного живлення.

Горизонтальна подача вихідного живлення дозволяє:

максимально використовувати простір знешламлюючого апарату - збільшити площу осадження твердої фази суспензії;

змінити траєкторію руху часток залізородної пульпи для максимальної їхньої взаємодії з висхідними потоками пульпи усередині апарата. Це дозволить збільшити можливості відмиву тонких та породних часток.

При роботі знешламлюючого апарата, у верхню ємність апарата надходить пульпа витратою Q_0 , яка під впливом гідравлічного стовпа висотою h надходить до живильного пристрою. Цей пристрій забезпечує горизонтальний вихід пульпи в апарат. Далі, у чані під впливом сил гравітації відбувається осадження твердих часток, які утворюють на дні ванни згущений продукт, що видаляється через Q_2 . Верхній шар пульпи в чані - освітлений шар (Q_1) видаляється через злив апарату.

При стаціонарному режимі операції знешламлення мають місце закони збереження. Виконується наступна рівність

$$Q_0 = Q_1 + Q_2, \quad (1)$$

де Q_0 – витрата пульпи, що надходить до апарату, m^3/z ; Q_1 – витрата освітленого продукту, що

надходить у злив, $m^3/3$; Q_2 – витрата згущеного продукту, m^3/c .

Аналогічно виконується рівність за обсягом твердого продукту, що переробляється

$$c_0 \cdot Q_0 = c_1 \cdot Q_1 + c_2 \cdot Q_2, \quad (2)$$

де c_0, c_1, c_2 – зміст твердого продукту в пульпі живлення, зливі й згущеному продукті, відповідно, частки од.

Вирішуючи систему рівнянь (1) і (2) щодо витрат, знаходимо

$$Q_1 = Q_0 \frac{c_2 - c_0}{c_2 - c_1}; \quad Q_2 = Q_0 \frac{c_0 - c_1}{c_2 - c_1}. \quad (3)$$

Під впливом гідравлічного стовпа висотою h пульпа виходить із живильного пристрою з деяким прискоренням. Скористаємося рівнянням Бернуллі для нестисливої рідини

$$g \cdot h = (1 + \xi) \frac{v_0^2}{2}, \quad (4)$$

де h – висота стовпа пульпи, м; g – прискорення вільного падіння, m/c^2 ; v_0 – швидкість пульпи на виході із пристрою живлення, m/c^2 ; ξ – коефіцієнт втрат.

З рівняння (4) знаходимо

$$v_0 = \sqrt{\frac{2gh}{1 + \xi}}. \quad (5)$$

Формула (5) визначає об'ємна витрати пульпи на вході в апарат

$$Q_0 = 2\pi \cdot R \cdot d_0 \cdot v_0, \quad (6)$$

де R – радіус напрямних пристрою живлення, м; d_0 – відстань між напрямними пристрою живлення, м.

Тоді, враховуючи (5), формула (6) має вигляд

$$Q_0 = 2\pi \cdot R \cdot d_0 \cdot \sqrt{\frac{2gh}{1 + \xi}}. \quad (7)$$

Витрата зливу розраховується по формулі

$$Q_1 = \pi(R_0^2 - r_0^2)v_1, \quad (8)$$

де R_0 – радіус ванни апарата, м; r_0 – радіус труби зануреної у ванну апарата, по якій подається пульпа, м; v_1 – швидкість зливу, що проходить через поперечний переріз ванни апарата, м/с.

Знаходимо витрату згущеного продукту по формулі

$$Q_2 = \pi \cdot R_1^2 \cdot v_2, \quad (9)$$

де v_2 – швидкість згущеного продукту, що виходить із апарат, м/сек; R_1 – радіус отвору, м.

Підставляючи формули (7), (8) і (9) в (3), знаходимо

$$v_1 = \frac{2R \cdot d_0}{R_0^2 - r_0^2} \sqrt{\frac{2gh}{1 + \xi}} \cdot \frac{c_2 - c_0}{c_2 - c_1}, \quad (10)$$

$$v_2 = \frac{2R \cdot d_0}{R_1^2} \sqrt{\frac{2gh}{1 + \xi}} \cdot \frac{c_0 - c_1}{c_2 - c_1}. \quad (11)$$

Формули (10) і (11) дозволяють визначити залежності швидкостей як від конструктивних параметрів дешламатора, так і від вимог, що задаються до самої операції дешламації. Швидкість осадження твердих часток, що надходять у ванну дешламатора, пов'язана з величинами швидкостей (10) і (11).

Диференціальне рівняння, що описує процес осадження твердих часток, які надходять у ванну дешламатора, у векторній формі має вигляд

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} + \vec{F}_{Ap} + \vec{F}_c, \quad (12)$$

де \vec{v} – вектор швидкості частки, м/с; m – маса частки, кг; g – прискорення вільного падіння, m/c^2 ; \vec{F}_{Ap} – сила Архімеда, Н; \vec{F}_c – сила опору, Н.

Диференціальне рівняння (12) у проєкціях на вертикальну вісь, спрямовану вниз, можна записати в наступному виді

$$m \frac{dv_y}{dt} = mg - F_{Ap} - F_c. \quad (13)$$

При цьому повинна виконуватися початкова умова

$$v_y(t=0) = -v_l. \quad (14)$$

Проекцію сили Архімеда можна записати у вигляді

$$F_{Ap} = \Delta \cdot V_T g, \quad (15)$$

де Δ – щільність рідини, у яку занурена частка, кг/м^3 ; V_T – об'єм частки, м^3 .

Враховуючи, що

$$m = \delta \cdot V_T, \quad (16)$$

де δ – щільність частки, кг/м^3 .

Формулу (15) представимо у вигляді

$$F_{Ap} = m \frac{\Delta}{\delta} g. \quad (17)$$

Проекція сили опору може бути записана як пропорційна проекції швидкості, тобто підкоряється закону Стокса

$$F_c = k(v_y + v_l), \quad (18)$$

де $k = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d$; μ – динамічна в'язкість, $\text{Па}\cdot\text{с}$; d – діаметр частки, м .

Гідравлічна крупність частки буде записана у вигляді

$$\theta = \frac{1}{18} \frac{(\delta - \Delta) \cdot g \cdot d^2}{\mu}. \quad (19)$$

Враховуючи формули (17), (18) і (19), рівняння (14) запишеться у вигляді

$$\frac{dv_y}{dt} = \left(1 - \frac{\Delta}{\delta}\right)g - \left(1 - \frac{\Delta}{\delta}\right)\frac{g}{\theta}(v_y + v_l). \quad (20)$$

Для дослідження результатів треба привести рівнянні (20) до безрозмірного виду

$$\frac{d\hat{v}_y}{d\tau} = 1 - \hat{v}_y - \hat{v}_l, \quad (21)$$

де $\hat{v}_y = \frac{v_y}{\theta}$, $\hat{v}_l = \frac{v_l}{\theta}$, $\tau = \frac{t}{\Delta t}$; $\Delta t = \theta / g \cdot \left(1 - \frac{\Delta}{\delta}\right)$ – гідравлічна одиниця часу, с .

При цьому початкова умова (14) набуває вид

$$\hat{v}_y(\tau=0) = -\hat{v}_l. \quad (22)$$

Розв'язок рівняння (21) має вигляд $\frac{d\hat{v}_y}{1 - \hat{v}_y - \hat{v}_l} = d\tau$, звідси

$$-\ln(1 - \hat{v}_y - \hat{v}_l) = \tau + c, \quad (23)$$

де c – довільна постійна.

Якщо $c=0$.

Тоді розв'язок рівняння (23) має вид

$$\hat{v}_y = 1 - \hat{v}_l - e^{-\tau}. \quad (24)$$

Частка буде підніматися доти, поки її швидкість не стане рівною нулю. Час підйому частки знаходиться: $1 - \hat{v}_l - e^{-\tau} = 0$, тобто

$$\tau_0 = -\ln(1 - \hat{v}_l). \quad (25)$$

Вирішуємо задачу Коши

$$\begin{cases} \frac{d\hat{y}}{d\tau} = 1 - \hat{v}_l - e^{-\tau}, \\ \hat{y}(\tau=0) = 0 \end{cases} \quad (26)$$

де $\hat{y} = \frac{y}{\Delta l}$, $\Delta l = \theta \cdot \Delta t$ – гідравлічна одиниця довжини, м .

Інтегруючи рівняння (26) знаходимо

$$\hat{y} = (1 - \hat{v}_1) \cdot \tau + e^{-\tau} - 1. \quad (27)$$

Час підйому частки обмежене глибиною занурення живильного пристрою h_0 у ванну апарата. Для знаходження часу досягнення часткою поверхні, вирішуємо рівняння

$$1 - e^{-\tau} - (1 - \hat{v}_1) \cdot \tau = \hat{h}_0, \quad (28)$$

де $\hat{h}_0 = h_0 / \Delta l$.

Рівняння (28) є нелінійним і допускає тільки чисельний розв'язок. Частка зможе осідати тоді, коли буде виконана умова

$$\tau_0 \leq \tau_1, \quad (29)$$

де τ_1 – розв'язок рівняння (28).

Таким чином, умова (29) дозволяє виділити частки, які будуть осаджуватися у ванні знешламлювача, якщо вони перебувають вище пристрою подачі вихідного живлення. Можна обчислити час досягнення дна ванни дешламатора. Якщо відомий час підйому частки, обумовлений формулою (25), то висота її підйому за цей час h' знаходиться згідно (27), тоді

$$\hat{h}' = 1 - e^{-\tau_0} - (1 - \hat{v}_1) \cdot \tau_0. \quad (30)$$

де $\hat{h}' = h' / \Delta l$.

Час осадження частки з висоти $h' + h_1$

$$\hat{v}_1 \cdot \tau - \pi \cdot \ln \operatorname{ch} \left(\frac{\tau}{\sqrt{\pi}} \right) = \hat{h}' + \hat{h}_1. \quad (31)$$

Тоді загальний час осадження частки знаходимо по формулі

$$\tau = \tau_0 + \tau', \quad (32)$$

де τ' – розв'язок рівняння (31), або в натуральних одиницях виміру буде мати такий вигляд $t = (\tau_0 + \tau') \cdot \Delta t$.

Частки, що попадають у потік пульпи нижче горизонтального живильного пристрою, захоплюються потоком униз. Швидкість осадження цих часток можна визначити розв'язком задачі Коши

$$\frac{d\hat{v}_y}{d\tau} = 1 - \hat{v}_y + \hat{v}_2, \quad (33)$$

$$\hat{v}_y = \hat{v}_2. \quad (34)$$

Цей розв'язок має вигляд

$$\hat{v}_y = 1 + \hat{v}_2 - e^{-\tau}. \quad (35)$$

Час осадження частки, що попадає в потік пульпи нижче горизонтального живильного пристрою, перебуває шляхом розв'язку завдання Коши

$$\frac{d\hat{y}}{d\tau} = 1 + \hat{v}_2 - e^{-\tau}, \quad (36)$$

$$\hat{y}(\tau = 0) = 0. \quad (37)$$

Розв'язок задачі Коші (36), (37) має вигляд

$$\hat{y} = (1 + \hat{v}_2) \cdot \tau + e^{-\tau}. \quad (38)$$

Знаходимо час осадження частки

$$(1 + \hat{v}_2) \cdot \tau + e^{-\tau} = \hat{h}_1. \quad (39)$$

Рівняння (39) є нелінійним і допускає тільки чисельний розв'язок.

Розрахунки швидкості часток рудної маси розміром $-0,071+0$ мм при щільності $2,6-4,2$ г/см³, згідно з рівняннями (10, 11, 19) показує, що значення швидкості частки взаємозалежна з геометричними параметрами часток, а також їх щільністю. Динаміка зміни швидкості частки, стосовно до магнетитової руди, має параболічну залежність щільності від геометричних параметрів.

Висновки. Стосовно до збагачуваної руди, при відомих значеннях параметрів знешламлення, які характеризуються обсягом подачі пульпи живлення, типом апарата, швидкістю висхідних потоків, представляється можливим прогнозувати поділ компонентів твердої фази пуль-

пи живлення й показників знешламлення в цілому, виходячи із гранулометричного складу рудної маси, а також стадії технологічного процесу. Отже, режим вихідного живлення апарата повинен забезпечувати максимальне відділення часток, що містять корисний компонент, від породних часток.

Список літератури

1. Козин В. З. Экспериментальное моделирование и оптимизация процессов обогащения полезных ископаемых / В. З. Козин. – М. : Недра, 1984. – 112 с.
2. Барский Л. А. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых / Л. А. Барский, В. З. Козин. – М. : Недра, 1978. – 486 с.
3. Шохин В. Н. Гравитационные методы обогащения / В. Н. Шохин, А. Г. Лопатин. – М. : Недра, 1980. – 400 с.
4. Тихонов О.Н. Введение в динамику массопереноса процессов обогатительной технологии / О.Н. Тихонов. – Л.: Недра, 1973. – 240 с.
5. Барский М.Д. Гравитационная классификация зернистых материалов / М.Д. Барский, В.И. Ревнивцев. – М.: Недра, 1974. – 232 с.
6. Остапенко П.Е. Обогащение железных руд / П.Е. Остапенко. – М.: Недра, 1977. – 272 с.
7. Остапенко П.Е. Теория и практика обогащения железных руд / П.Е. Остапенко. – М.: Недра. 1985. – 270 с. МГУ – 2000. – С. 1–6.
8. Рубинштейн Ю.Б. Математические методы в обогащении полезных ископаемых / Ю.Б. Рубинштейн, Л.А. Волков. – М.: Недра, 1987. – 296 с.
9. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения / П.В. Лященко. – Гостоптехиздат, 1940. – 359 с.
10. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых / В.Г. Деркач. – М.: Недра, 1966. – 338 с.

Рукопис подано до редакції 06.04.2021

UDC 622.73:519.216.3

D.V. SHVETS, Senior Lecturer
Kryvyi Rih National University

THEORETICAL-PROBABILITY APPROACH TO ANALYSE THE IRON ORE GRINDING PROCESS

Purpose. To estimate the stochastic properties of the primary iron ore grinding output variables.

Research methods. Getting real-time information on the stochastic properties of the initial iron ore materials using the operation monitoring of the iron ore characteristics at the primary grinding.

Scientific novelty. Using a theoretical-probability approach to assess the properties of the primary iron ore grinding output variables based on information on the stochastic properties of the initial iron ore materials.

Practical value. The theoretical-probability approach to assess the stochastic properties of the output variables of the primary grinding iron ore materials allows for better control over the processing of iron ore raw materials at the concentrating factories, reducing the variability of the grinding parameters, improving the quality of iron ore concentrate and competitiveness in the global market.

Results. The formulas on the numerical characteristics of the output variables of the primary grinding characterize the average values and variance of the average values depending on the stochastic properties of iron ore at the input of the primary grinding process—iron content and hardness. The expressions on the probabilities of the output variables hitting within the specified intervals are provided. In modeling, the theoretical-probability approach enables to evaluate the stochastic properties of the primary iron ore grinding output variables—drain density of the classifier at the primary grinding and classification and iron content of an ore at the primary magnetic separation by linking them with the stochastic content of iron in iron ore and its hardness at the input of the primary grinding process. The research results define and facilitate management task of the primary grinding process in view of stochasticity of its variables.

Key words: iron ore, theoretical-probability approach, grinding.

doi: 10.31721/2306-5435-2021-1-109-111-117

The problem and its connection with scientific and practical tasks. Iron ore mining and processing rank very high in the economy and industry of Ukraine. About 20% of the world's iron ore resources are on the territory of Ukraine and the annual production of iron ore materials in Kryvybas surpasses 60 million tons [1].