

УДК 622.7: 534

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори технічних наук, професори,
В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц., О. Ю. СЕРДЮК, асист.,
А. А. ГАПОНЕНКО, І. А. ГАПОНЕНКО, наукові співробітники,
Криворізький національний університет

ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БАЗИ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ОСАДЖЕННЯ ЧАСТОК ТВЕРДОЇ ФАЗИ РУДНОЇ ПУЛЬПИ У ДЕШЛАМАТОРІ

Метою дослідження є розробка методів та засобів ультразвукових вимірювань характеристик процесу осадження частинок твердої фази пульпи та оцінка можливості їх застосування у системі автоматичного керування дешламатором для підвищення ефективності його роботи.

Методи дослідження. Для кількісного оцінювання мінеральних продуктів використано показник розподілу мінеральних часток по фракціях з різними фізичними властивостями, а також показник розподілу корисних компонентів. Зазначені показники дозволяють виконати кількісне оцінювання рудного матеріалу. Для кількісного оцінювання ефективності роботи технологічних апаратів використовуються сепараційні характеристики.

Наукова новизна. Пропонований метод формування керування процесом згущення заснований на оцінці зміни густини пульпи і гранулометричного складу її твердої фази в початковій стадії осадження у дешламаторі, що дозволяє спрогнозувати характеристики згущеного продукту і за рахунок цього врахувати велику інерційність системи. З цією метою вимірюються характеристики ультразвукових хвиль, що пройшли через контрольований об'єм пульпи, який осаджується у дешламаторі.

Практичне значення. Визначені параметри дозволяють підтримувати продуктивність процесу дешламації у відповідності до характеристик рудної суспензії мінімізуючи втрати корисного компонента. Завдяки отриманню оперативної інформації щодо характеристик процесу осадження часток твердої фази рудної суспензії вже на його початковій стадії вдається зменшити тривалість перехідних процесів у системі автоматичного керування.

Результати. Визначення вже на початковій стадії процесу осадження частинок подрібненої руди у дешламаторі таких показників, як динаміка зміни густини пульпи і гранулометричного складу її твердої фази дозволяє враховувати коливання параметрів технологічного потоку. Це досягається як за рахунок регулювання кількості флокулянту, так і швидкості відкачування продукту. Система автоматичного керування на основі отриманої інформації та сучасних програмно-технічних засобів дозволяє долати повільну динаміку відгуку на керуючі впливи та перехресні впливи керованих змінних. Для досягнення оптимальних показників процесів згущення-дешламації системи керування даними процесами мають бути сформовані як модулі ієрархічної структури управління всім технологічним процесом збагачення руди. Запропонований підхід дозволяє врахувати характер розподілу часток твердої фази рудного матеріалу у дешламаторі за крупністю, встановити характеристики вихідного продукту дешламатора. у відповідності до параметрів процесу осадження часток руди і за рахунок цього зменшити втрати корисного компонента на 0,6–0,7 %.

Ключові слова: дешламатор, ультразвук, автоматичне керування, моделювання, залізна руда, пульпа.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-53-57

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Розроблений на даний час математичний апарат дозволив створити засоби для проектування, моделювання та управління промисловими згущувачами [1-3]. Водночас, застосування математичних моделей ускладнюється через відсутність можливості експериментального визначення параметрів відповідних залежностей. Знання зазначених параметрів математичних моделей необхідне при формуванні керування та експлуатації подрібнюючих млинів, класифікуючих агрегатів, флотаційних машин та магнітних сепараторів, обладнання для поділу твердої та рідкої фаз, а також засобів транспортування концентрату та хвостів. Для синтезу ефективного керування процесами згущення залізородної сировини мають бути вирішені проблеми, пов'язані із великими сталими часу, нелінійністю характеристик, наявністю збурюючих впливів і завад [4].

Аналіз досліджень і публікацій. Досить великий період відбору проб пульпи для аналізу в існуючій системі управління дешламатором, а також наявність збурюючих впливів, обумовлених зміною витрати, густини і характеристик вихідної пульпи не дозволяє гарантувати підтримку густини вихідної пульпи у відповідності до технологічного регламенту. Для подолання цього недоліку доцільною є модернізація системи керування магнітним дешламатором.

Результати дослідження процесу зневоднення суспензій, тверда фаза яких складається головним чином з надтонких частинок представлено у праці [5]. Проте у даній роботі не враховано питання формування керуючих впливів безпосередньо в ході технологічного процесу для підвищення ефективності процесів згущення.

Метод вимірювання фазової швидкості та згасання ультразвуку в суспензіях з метою оцінки їх характеристик розглянуто у роботі [6]. Результати досліджень показують, що фазова швидкість ультразвукових хвиль збільшується зі збільшенням кількості дрібних частинок в суспензії. Дисперсія обумовлена наявністю твердої фази та корелює з її масовою часткою. Результати експериментів показують, що можливе зворотне обчислення властивостей пульпи шляхом підгонки моделі до експериментальних даних, якщо відомий розподіл розмірів часток твердої фази.

Традиційне управління дешламатором ґрунтується на використанні одноконтурних систем керування з пропорційно-інтегральними (ПІ) регуляторами [7]. Водночас, як показує практика, така архітектура керування не є оптимальною для керування процесом із повільною та складною динамікою. Залежно від технологічної схеми, що використовується на підприємстві, можуть бути поставлені різні цілі для оптимізації продуктивності згущувача: цільова густина продукту використовується для забезпечення оптимального вмісту твердих частинок у хвостах, оптимального ступеня видалення води для млина тощо. Заданий рівень осаду використовується для отримання оптимального завантаження згущувача без навантаження приводного механізму. Тиск на дні дешламатора використовують як показник запасу твердих частинок. Це допомагає системі визначити, чи високий рівень шару результатом зниження швидкості осідання або збільшення концентрації твердих частинок. У деяких випадках цільовий момент, що крутить, використовується як показник прийнятної реології нижнього потоку.

Утримувати всі релевантні змінні в допустимих межах, одночасно, забезпечуючи при цьому оптимальний контроль відсоткового вмісту сухих речовин у потоці - це те, чого прагнуть багато авторів при формуванні стратегії управління згущувачами [8-10].

Однак за будь-якої стратегії управління добре мати якомога більше інформації про значення важливих змінних. Що стосується дешламатором можна виміряти кілька величин. Це може бути, наприклад, крутний момент приводу грабель, рівень шару, тиск на дні дешламатора, об'ємна витрата на вході та виході, а також відсоток твердого потоків. Додаткові виміри дозволяють реалізувати і ефективніші стратегії управління [11].

Постановка завдання. Метою виконаних досліджень є розробка методів та засобів ультразвукових вимірювань характеристик процесу осадження частинок твердої фази пульпи та оцінка можливості їх застосування у системі автоматичного керування дешламатором для підвищення ефективності його роботи.

Викладення матеріалу і результати. Технологічні лінії збагачення складаються, як правило, з декількох послідовно розташованих стадій, кожна з яких включає такі основні технологічні операції: подрібнення, класифікація, магнітна сепарація. Метою цих операцій є розкриття рудних зростків та розділення часток різних мінералів один від одного шляхом скорочення крупності мінеральних зерен до 0,1 мм і менше.

Для кількісного оцінювання мінеральних продуктів крім показника розподілу мінеральних часток $\gamma(\xi)$ по фракціях з різними фізичними властивостями ξ , зазвичай використовують також показник розподілу корисних компонентів $\beta(\xi)$. Показники $\gamma(\xi)$ і $\beta(\xi)$ дозволяють виконати кількісне оцінювання рудного матеріалу. Для кількісного оцінювання ефективності роботи технологічних апаратів використовуються сепараційні характеристики $\varepsilon(\xi)$.

Дешламатор є невід'ємною складовою технологічної лінії збагачення руди та результати його роботи безпосередньо впливають на якісно-кількісні показники отримуваних продуктів.

У роботах [1,11] показано, що система автоматичного керування дешламатором має забезпечувати ефективність його роботи, а саме: стабілізувати показники процесу згущення, формувати концентрацію згущеного продукту з урахуванням вимог технологічного процесу, мінімізувати витрати флокулянту. Система керування здійснює безперервну корекцію регульованих параметрів процесу на основі результатів оперативного вимірювання його характеристик. Оптимальні умови роботи дешламатора визначаються за характеристиками встановленого режиму, а система автоматичного керування використовується для стабілізації його роботи при вибраних значеннях параметрів процесу.

Виділяють такі параметри процесу згущення. Вихідними параметрами є: концентрація згущеного продукту та рівень осаду. Керованими параметрами є: об'ємна витрата згущеного продукту та витрата флокулянту. Режимними параметрами є: функція густини потоку твердого та ефективний тиск твердого. До збурюючих факторів відносять: гранулометричний склад, густину вхідного продукту та його витрату. На практиці здійснюють вимірювання таких пара-

метрів: густина вхідного продукту, густина згущеного продукту, рівень осаду, тиск на дно, крутний момент, мутність зливу, величина струм насоса згущеного продукту.

У роботах [12,13] пропонуються різні математичні моделі процесу згущення рудної сировини. Наприклад, прийнята міжнародному рівні феноменологічна модель, описує процес згущення суспензії у дешламаторі з урахуванням виродженого параболічного диференціального рівняння другого порядку [14,15]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (q\varphi + f_{bk}(\varphi)) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f_{bk}(\varphi)\sigma_c'(\varphi)\partial\varphi}{\Delta\rho\varphi g} \right), \quad (1)$$

де (z, t) – вертикальна спрямована вгору просторова координата і час, φ – об'ємна частка твердого, $q(t)$ – об'ємна витрата (об'єм згущеного продукту на одиницю площі згущувачів), $f_{bk}(\varphi) = \varphi v_s(\varphi)$ – густина потоку твердого по Кінчу, $v_s(\varphi)$ – початкова швидкість осідання продукту при концентрації φ , $\sigma_c(\varphi)$ – ефективний тиск твердого, $\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$ – різниця густин твердого та рідини, g – прискорення сили тяжіння. Дана модель та інші запропоновані моделі демонструють той факт, що наявність інформації про фактичну поведінку частинок твердої фази пульпи в процесі її осадження дозволяє спростити формування керуючих впливів процесу згущення у дешламаторі.

Пропонований метод формування керування процесом згущення заснований на оцінці зміни густини пульпи і гранулометричного складу її твердої фази в початковій стадії осадження у дешламаторі, що дозволяє спрогнозувати характеристики згущеного продукту і за рахунок цього врахувати велику інерційність системи. З цією метою вимірюються характеристики ультразвукових хвиль, що пройшли через контрольований об'єм пульпи, який осаджується у дешламаторі [6,16].

Позначимо інтенсивність ультразвукового сигналу при проходженні ним фіксованої відстані в пульпі через [17]

$$\xi = I_0 \exp \left\{ -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^k \sigma(r_i) Z \right\} \quad (2)$$

де $\sigma(r_i)$ – перетин згасання ультразвуку на частинках радіусу r_i .

Дисперсія цієї величини визначиться виразом

$$D_\xi = M(\xi - \langle \xi \rangle)^2 = M(\xi^2 - 2\xi \langle \xi \rangle + \langle \xi \rangle^2) = M\xi^2 - \langle \xi \rangle^2. \quad (3)$$

Враховуючи що

$$\xi^2 = I_0 \exp \left\{ -\frac{2}{V} \sum_{i=1}^k \sigma(r_i) Z \right\}, \quad (4)$$

отримаємо

$$M\xi^2 = \sum_{k=0}^{\infty} M \left(\frac{\xi^2}{k} \right) F(k). \quad (5)$$

Математичне сподівання величини для фіксованого числа подрібнених частинок k матеріалу в контрольованому обсязі:

$$M \left(\frac{\xi^2}{k} \right) = \left[\int_0^{\infty} e^{\frac{2}{V}\sigma(r)Z} F(r) dr \right]^k = \eta_1^k; \quad (6)$$

$$M(\xi^2) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\eta_1^k \bar{N}^k e^{-\bar{N}}}{k!} = e^{-\bar{N}(1-\eta_1)}; \quad (7)$$

$$M(\xi^2) = I_0^2 \exp \left\{ -nV \left(1 - \int_0^{\infty} e^{-\frac{2}{V}\sigma(r)Z} F(r) dr \right) \right\}. \quad (8)$$

Середнє значення величини сигналу, що пройшов через контрольований об'єм пульпи V

$$\langle \xi \rangle = I_0 \exp \left\{ -nV \left(1 - \int_0^{\infty} e^{-\frac{1}{V}\sigma(r)Z} F(r) dr \right) \right\}. \quad (9)$$

Підставимо знайдені значення у вираз (3)

$$D\xi = I_0^2 \exp \left\{ -nV \left(1 - \int_0^{\infty} e^{-\frac{2}{V}\sigma(r)Z} F(r) dr \right) \right\} - I_0^2 \exp \left\{ 2nV \left[1 - \int_0^{\infty} e^{-\frac{1}{V}\sigma(r)Z} F(r) dr \right] \right\}. \quad (10)$$

Виконаємо перетворення доданків і введемо позначення

$$\psi = \exp \left\{ \frac{nZ^2}{V} \int_0^{\infty} \sigma^2(r) F(r) dr \right\}; \quad (11)$$

$$\frac{\sqrt{D\xi}}{\langle \xi \rangle} = \sqrt{\psi - 1} = a. \quad (12)$$

Тоді $\psi = 1 + a^2$.

Враховуючи що $\sqrt{\psi} \approx 1$, отримаємо

$$\langle \xi \rangle = I_0 \exp \left\{ \frac{-ZW \int_0^\infty \sigma(r)F(r)dr}{\int_0^\infty 4/3\pi r^3 F(r)dr} \right\} \quad (13)$$

і, отже

$$\ln \frac{I_0}{\langle \xi \rangle} = ZW \frac{\int_0^\infty \sigma(r)F(r)dr}{\int_0^\infty 4/3\pi r^3 F(r)dr} \quad (14)$$

Визначимо характеристичну функцію

$$S' = \frac{\ln \psi}{\ln I_0 / \langle \xi \rangle} = \frac{Z \int_0^\infty \sigma^2(r)F(r)dr}{V \int_0^\infty \sigma(r)F(r)dr} \quad (15)$$

З останнього виразу видно, що величина S' є функцією крупності частинок твердого у пульпі. Таким чином, вимірюючи параметри I_0 , $\langle \xi \rangle$, $D\xi$ та обчислюючи параметр S' , можна оцінити гранулометричний склад твердої фази пульпи, яка осаджується у дешламаторі.

З урахуванням використовуваного підходу та сформованої інформаційної бази алгоритм управління дешламатором може бути сформульований як задача оптимізації [9]

$$\min = \int_{t_k}^{t_k+\Delta k} (W_x(\tilde{x}(t) - x_{SS})^2 + W_u(u(t) - u_{SS})^2) dt, \quad (16)$$

де рівняння стану має вигляд

$$\dot{\tilde{x}}(t) = f(\tilde{x}(t)) + g(x(t))u(t), \quad (17)$$

де \tilde{x} – прогнозоване значення x ; k – горизонт прогнозування; W_x, W_u – вага. При цьому u – функція, що мінімізує задачу оптимізації, повинна перебувати в множині кусочно-неперервних функцій [18].

Визначені параметри дозволяють підтримувати продуктивність процесу дешламації у відповідності до характеристик рудної суспензії мінімізуючи втрати корисного компонента. Завдяки отриманню оперативної інформації щодо характеристик процесу осадження часток твердої фази рудної суспензії вже на його початковій стадії вдається зменшити тривалість перехідних процесів у системі автоматичного керування.

Висновки та напрями подальших досліджень. Визначення вже на початковій стадії процесу осадження частинок подрібненої руди у дешламаторі таких показників, як динаміка зміни густини пульпи і гранулометричного складу її твердої фази дозволяє враховувати коливання параметрів технологічного потоку. Це досягається як за рахунок регулювання кількості флокулянту, так і швидкості відкачування продукту.

Система автоматичного керування на основі отриманої інформації та сучасних програмно-технічних засобів дозволяє долати повільну динаміку відгуку на керуючі впливи та перехресні впливи керованих змінних. Для досягнення оптимальних показників процесів згущення-дешламації системи керування даними процесами мають бути сформовані як модулі ієрархічної структури управління всім технологічним процесом збагачення руди.

Запропонований підхід дозволяє врахувати характер розподілу часток твердої фази рудного матеріалу у дешламаторі за крупністю, встановити характеристики вихідного продукту дешламатора. у відповідності до параметрів процесу осадження часток руди і за рахунок цього зменшити втрати корисного компонента на 0,6–0,7 %.

Список літератури

1. Segovia J. P., Concha F., Sbarbaro D. On the control of sludge level and underflow concentration in industrial thickeners. Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28. September 2, 2011. P. 8571 -8576.
2. Arjmand R., Massinaei M., Behnamfard A. Improving flocculation and dewatering performance of iron tailings thickeners. Journal of Water Process Engineering. 2019. Vol. 31. 100873. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100873.
3. Garmsiri M.R., Unesi M. Challenges and opportunities of hydrocyclone-thickener dewatering circuit: A pilot scale study. Minerals Engineering. 2018. Vol. 122. P. 206-210. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.04.001.
4. Betancourt F., Urger R., Diehl S., Faras S. A model of clarifier-thickener control with time-dependent feed properties. Presented at Physical Separation '13, Falmouth, UK, June 20 and 21, 2013. P. 1-21.
5. Tripathy S.K., Murthy Y.R., Farrokhpay S., Filippov L.O. Design and Analysis of dewatering circuits for chromite processing plant tailing slurry. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2019. DOI: 10.1080/08827508.2019.1700983.
6. Aitomaki Y. Towards a measurement of paper pulp quality: ultrasonic spectroscopy of fibre suspensions. Lulea University of Technology Department of Computer Science and Electrical Engineering EISLAB 2006:20.
7. Control strategies for thickeners – Rhosonics. URL: <https://rhosonics.com/news/control-strategies-for-thickeners>.
8. Xu N., Wang X., Zhou J., Wang Q., Fang W., Peng X. Intelligent control strategy for thickening process. International Journal of Mineral Processing. 2015. Vol. 142, P. 56-62.

9. Zhang J., Yin X., Liu J. Economic MPC of deep cone thickeners в coal benedication, The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2016. Vol. 94. DOI: 10.1002/cjce.22419.
10. Tan C.K., Setiawan R., Bao J., Bickert G. Studies on parameter estimation and model predictive control of paste thickeners. Journal of Process control. 2015. Vol. 28. DOI: 10.1016/j.jprocont.2015.02.002.
11. Basics in Minerals Processing, Metso Corporation, 2015. URL: <https://www.mogroup.com/insights/e-books/basics-in-minerals-processing-handbook/>
12. Teerikoski S. Optimal control of clarifier-thickeners. Uppsala University, 2017. 73 p.
13. Chai T., Li H., Wang H. An intelligent switching control для intervals of concentration and flow-rate underow slurry in mized separation thickener. 19th IFAC World Congress. Cape Town 2014.
14. Burger R., Diehl S., Faras S., Nopens I., Torfs E. A consistent modelling methodology for secondary settling tanks: a reliable numerical method. Water Science & Technology. 2013. Vol. 68(1). 23823556. DOI: 10.2166/wst.2013.239
15. Barth A., Burger R., Kroker I., Rohde C. Computational uncertainty quantification for a clarifier-thickener model with several random perturbations: A hybrid stochastic Galerkin approach. Computers & Chemical Engineering. 2016. Vol. 89. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.02.016.
16. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Simulation of high-energy ultrasound propagation in heterogeneous medium using k-space method. Metallurgical and Mining Industry. 2014. Vol. 6. No. 3. P. 23–27.
17. Morkun V., Morkun N. Estimation of the crushed ore particles density in the pulp flow based on the dynamic effects of high-energy ultrasound. Archives of Acoustics. 2018. Vol. 43. No. 1. P. 61–67.
18. Burger R., Diehl S., Faras S., Nopens I. On reliable and unreliable numerical methods for simulation of secondary settling tanks in wastewater treatment. Computers and Chemical Engineering. 2021. Vol. 41. P. 93-105

Рукопис подано до редакції 05.11.2021

УДК 669.162.267.6

О.С. ВОДЕННИКОВА, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний університет
Л.В. ВОДЕННИКОВА, асист., Запорізький державний медичний університет
І.Е. СКІДІН, канд. техн. наук, ст. викл. Л.Н. САЙТГАРЕЄВ, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет
П.В. ГОЛОВКОВ, студ., Запорізький національний університет

ПОЗАДОМЕННА ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ ЧАВУНУ: ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АНАЛІТИЧНО-РОЗРАХУНКОВА ОБРОБКА ПОКАЗНИКІВ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ

Мета. Метою роботи є пошук раціональних шляхів зменшення вмісту сірки після позадоменної десульфурації чавуну для отримання низькосірчатої сталі.

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями: проаналізувати сучасні технології позадоменної десульфурації з застосуванням різних реагент-десульфураторів; визначити найбільш раціональні технології позадоменної десульфурації чавуну, які дозволяють досягти ступеня десульфурації чавуну до 80–99 % та вмісту сірки після десульфурації чавуну до 0,003 %; на основі відомих експериментальних та розрахункових даних запропонувати аналітично-розрахункову обробку показників десульфурації чавуну.

Методи досліджень. У роботі застосовувалися загальні (емпіричні, комплексні й теоретичні) та спеціальні (графічні та кореляційні) методи наукових пізнань. Так при узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з аналізу сучасного досвіду технологій позадоменної десульфурації чавуну використовувався комплексний підхід. Аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних (фактичних) та розрахункових даних залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну проводилася кореляційно-регресійним методом в програмі Excel (з оцінкою коефіцієнту детермінації).

Наукова новизна. Показано вплив вмісту магнію в чавуні на вміст сірки після десульфурації чавуну при застосуванні в якості реагент-десульфуратора гранульованого магнію, пасивованого магнію у шматках, порошкового магнієвого дроту, суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна. Здобула подальший розвиток аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних (фактичних) та розрахункових даних з оцінкою коефіцієнту детермінації, що показує на можливості зменшення вмісту сірки після позадоменної десульфурації чавуну до 0,003 %.

Практичне значення. Результати пошуку раціональних шляхів збільшення ступеня десульфурації чавуну для отримання низькосірчатої сталі можуть бути використані при викладанні спеціальних дисциплін для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 136 «Металургія» (наприклад, навчальної дисципліни «Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу»).

Результати. Проаналізовано технологічні аспекти застосування на металургійних підприємствах України та зарубіжжя сучасних технологій позадоменної десульфурації чавуну, які дозволяють досягти значень ступеня десульфурації чавуну в межах 80–99 % та вмісту сірки після десульфурації чавуну до 0,003 %.

Ключові слова: десульфурація чавуну, низькосірчата сталь, реагент-десульфуратор, ступінь десульфурації, вміст сірки.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-57-64