В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц., О. Ю. СЕРДЮК, асистент
Криворізький національний університет

ФОРМУВАННЯ СЕПАРАЦІЙНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСУ ЗГУЩЕННЯ РУДНОЇ СИРОВИНИ НА ОСНОВІ МЕТОДУ МОДЕЛЬНОГО ПРОГНОЗУЮЧОГО КЕРУВАННЯ

Метою дослідження є формування оптимальної сепараційної характеристики технологічних збагачувальних процесів на основі оперативної інформації про динаміку їх параметрів на прикладі процесу згущення рудної сировини.

Методи дослідження. У роботі використано такі методи: аналіз вітчизняного і закордонного досвіду; методи математичної статистики і теорії імовірності для оброблення результатів експериментів; методи аналітичного конструювання і комп'ютерного моделювання; методи модельного прогнозного керування при розробці алгоритмів керування процесом згущення; методи чисельного моделювання для синтезу і аналізу математичної моделі.

Наукова новизна полягає у визначенні оптимальних з точки зору якості керування значень горизонту керування та горизонту прогнозування одноканальної системи модельного прогнозного керування процесом згущення рудної сировини.

Практичне значення полягає у розробленні методики і програмного забезпечення для визначення оптимальних з точки зору якості керування значень горизонту керування та горизонту прогнозування одноканальної системи модельного прогнозного керування процесом згущення рудної сировини. Зазначене дозволяє оптимізувати сепараційну характеристику процесу згущення рудної сировини.

Результати. Для формування сепараційної характеристики процесу згущення рудної сировини на основі методу модельного прогнозного керування для одноканальної системи керування процесом згущення задовільні результати керування забезпечуються встановленням горизонту керування таким, що дорівнює 1 інтервал. За даного значення квадратична помилка керування не перевищує 0,1452–0,1474. Подальше збільшення горизонту прогнозування є недоцільним, оскільки не дозволяє суттєво зменшити квадратичну помилку керування. Водночас, достатнім значенням горизонту прогнозування є величина 3–5 інтервалів. Такі значення обумовлюються тим, що зростання обчислювальної складності процесу прогнозування на 10–20 інтервалів призводить до незначного зменшення квадратичної помилки керування.

Ключові слова: модельне прогнозує керування, оптимізація, згущення рудної сировини, сепараційна характеристика.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-8-14

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Оптимізація технологічної лінії збагачення рудної сировини потребує визначення результуючої сепараційної характеристики з робочою точкою у оптимальній границі розділення. Водночас, у технологічних потоках лінії збагачення на різних стадіях можуть перероблюватись суттєво різні за своїми фізико-механічними та хіміко-мінералогічними характеристиками різновиди рудної сировини [1–3]. Отже, потребує дослідження питання формування сепараційної характеристики технологічних збагачувальних процесів, зокрема, згущення рудної сировини, на основі оперативної інформації про динаміку їх параметрів.

Аналіз досліджень та публікацій. Технологічні процеси рудозбагачувальних фабрик передбачають багатостадійне дроблення і подрібнення руди для його підготовки до наступної сепарації [4, 5]. Метою цих операцій є розкриття рудних зростків і виокремлення часток різних мінералів шляхом скорочення крупності мінеральних зерен до 0,1 мм і менше. У деяких випадках розмах розміру вкраплень корисного компонента перекидає декілька класів крупності, які використовують для оцінювання гранулометричного складу продуктів збагачення на гірничозбагачувальних комбінатах: «+3», «-3+1», «-1+0,5», «-0,5+0,25», «-0,25+0,125», «-0,125+0,071», «-0,071+0,056», «-0,056+0,044», «-0,044+0».

Відповідно до результатів досліджень [4, 6, 7] для кількісного оцінювання мінеральних продуктів окрім показника розподілу мінеральних часток $\gamma(\xi)$ по фракціях з різними фізичними властивостями ξ , доцільно використовувати 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 запропонова-

но використовувати сепараційні характеристики $\varepsilon(\xi)$, які визначають величину вилучення ε мінеральних фракцій у продукти збагачення. Виділення корисного компонента в концентрат з вхідного рудного матеріалу здійснюється на основі відмінності фізичних властивостей ξ даного компонента і супутніх мінералів. У робочих зонах збагачувальних агрегатів під дією фізичних сил відбувається розділення часток. Частки з одними фізичними властивостями ($\xi > \xi_p$) рухаються в одну частину робочої зони (концентрат), а частки з іншими властивостями ($\xi < \xi_p$) – в іншу (хвости).

Сепараційна характеристика є неперервною функцією $\varepsilon(\xi)$, яка визначає залежність вилучення елементарних фракцій $[\xi, \xi + \Delta\xi]$ у концентрат від фізичної властивості ξ [4, 7]. Ідеальна сепараційна характеристика має сходинковий вигляд зі стрибком у точці ξ_p . Дана точка відповідає елементарній фракції, яка наполовину вилучається у концентрат, наполовину – у хвости. Реальні технологічно агрегати мають неідеальну сепараційну характеристику з деяким нахилом $tg\alpha = d\kappa(\xi) / d\xi|_{\xi=\xi_p}$ у робочій точці, що відповідає границі розділення $\xi = \xi_p$. З фізичною властивістю ξ кожної мінеральної частки корелюється вміст у ній цінного компонента β : зі зростанням ξ зростає β (або навпаки).

Постановка завдання. Метою роботи розроблення методу автоматизованого керування процесом згущення рудної сировини для оптимізації сепараційної характеристики даного технологічного процесу в умовах збагачення декількох мінералого-технологічних різновидів руди на основі методу модельного прогнозування.

Викладення матеріалу та результати. Приклад співставлення вмісту корисного компонента у певному класі крупності до виходу даного класу, розподіленого по технологічній лінії збагачення, представлено на рис. 1. Результати випробування технологічної лінії збагачення отримані при виконанні робіт під керівництвом проф. Т. А. Олійник [8, 9].

Рис. 1. Вміст корисного компонента у класі крупності та вихід даного класу, розподілені по технологічній лінії

Вилучення кінцевих фракцій одержують розділенням загального діапазону $[\xi_{\min}, \xi_{\max}]$ змінення фізичної властивості ξ суміші часток руди на певну кількість фракцій $\Delta\xi_1, \Delta\xi_2, \dots, \Delta\xi_n$ [4]. Вилучення твердої фракції $[\xi_i, \xi_i + \Delta\xi_i]$ у концентрат дорівнює співвідношенню продуктивності твердої даної фракції у концентраті $P_{i\kappa}$ та вхідному матеріалі $P_{i\text{ex}}$

$$\varepsilon_{i\kappa} = \frac{P_{i\kappa}}{P_{i\text{ex}}} = \frac{Q_{\kappa} \bar{\gamma}_{i\kappa}}{Q_{\text{ex}} \bar{\gamma}_{i\text{ex}}} = \frac{Q_{\kappa} \gamma_{i\kappa}(\xi_i) \Delta\xi_i}{Q_{\text{ex}} \gamma_{i\text{ex}}(\xi_i) \Delta\xi_i}, \quad (1)$$

де $Q_{\kappa}, Q_{\text{ex}}$ – продуктивності твердої відповідно за концентратом та вхідним матеріалом, т/год; $\bar{\gamma}_{i\kappa}, \bar{\gamma}_{i\text{ex}}$ – вихід фракції відповідно у концентраті та вхідному матеріалі; $\gamma_{i\kappa}(\xi), \gamma_{i\text{ex}}(\xi)$ – розподілення твердої по фракціях відповідно у концентраті та вхідному матеріалі. Застосування даної формули до кожної фракції дозволяє одержати ряд вилучень фракцій $\varepsilon_{1\kappa}, \varepsilon_{2\kappa}, \dots, \varepsilon_{n\kappa}$. При виконанні умови $\Delta\xi_i \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$ згаданий ряд перетворюється на неперервну функцію – сепараційну характеристику [4].

Значення точок сепараційної характеристики першої стадії класифікації, розраховані за формулою (1) та даними експериментальних досліджень [8, 9], представлено у табл. 2.

Графічне представлення сепараційних характеристик класифікувальних агрегатів технологічної лінії рудозбагачувальної фабрики подано на рис. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку сепараційної характеристики першої стадії класифікації

Клас крупності, мм	Вихід фракції на вході, %	Вихід фракції на виході, %	Розмір фракції $\Delta \xi$,	Сепараційна характеристика
-1+0,5	23,40	1,50	0,500	0,0000
-0,5+0,25	19,10	8,00	0,250	0,0000
-0,25+0,125	8,90	10,90	0,125	0,0224
-0,125+0,071	5,70	11,00	0,054	0,1461
-0,071+0,056	4,10	9,40	0,015	0,4272
-0,056+0,044	2,40	6,00	0,012	0,6731
-0,044+0	23,00	53,20	0,044	0,7997
Всього	100,00	100,00

Рис. 2. Сепараційні характеристики класифікувальних агрегатів технологічної лінії рудозбагачувальної фабрики

Числові значення сепараційних характеристик подано у табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунку сепараційних характеристик класифікувальних агрегатів

Клас крупності, мм	Класифікатор 1 (злив)	Класифікатор 2 (піски)	Дешламатор 1 (піски)	Класифікатор 3 (злив)	Дешламатор 2 (піски)
+3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
-3+1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
-1+0,5	0,0224	0,1376	0,0000	0,0000	0,0000
-0,5+0,25	0,1461	0,2016	0,0000	0,0000	0,0000
-0,25+0,125	0,4272	0,2510	0,0000	0,0000	0,0000
-0,125+0,071	0,6731	0,3445	0,9171	0,0000	0,0000
-0,071+0,056	0,7997	0,4354	0,9395	0,1154	0,8846
-0,056+0,044	0,8720	0,4408	0,9892	0,1306	0,8846
-0,044+0	0,8068	0,1669	0,8756	0,3594	0,9379

Для використання сепараційних характеристик технологічних агрегатів у системах керування процесами збагачення необхідно здійснити їх апроксимацію. Основні результати апроксимації представлено у табл. 4.

Таблиця 4

Результати апроксимації сепараційних характеристик класифікувальних агрегатів

Функція	Кількість коефіцієнтів	SSE	R-square	Adjusted R- square	RMSE
Гаусова	3	0.01177	0.9897	0.9863	0.04429
Лінійна	3	0.09543	0.9169	0.8892	0.1261
Поліноміальна	2	0.1013	0.9118	0.8992	0.1203
	3	0.1012	0.9118	0.8824	0.1299
Степенева	2	0.4844	0.578	0.5177	0.2631
	3	0.09881	0.9139	0.8852	0.1283

Оцінювання параметричних моделей (табл. 4) здійснювалось за такими показниками. Сумарний квадрат залишків (Sum of Squares due to Error, SSE) розраховано за формулою [10]

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2. \quad (2)$$

Чим ближчим до 0 є одержане значення тим меншою є величина компонента випадкової помилки, що вказує на високу точність моделі.

Множинний коефіцієнт детермінації (R-Square) показує, яка частка дисперсії результату спричинена впливом незалежних змінних. Даний показник визначається як відношення суми квадратів регресії (Sum of squares of the regression, SSR) і загальної суми квадратів (Total Sum of Squares, SST). Показники SSR та SST визначається таким чином [10]

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2, \quad SST = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2. \quad (3)$$

Водночас, названі показники пов'язані співвідношенням: $SST = SSR + SSE$.

Множинний коефіцієнт детермінації (R-Square) визначають таким чином [11]

$$R - square = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}. \quad (4)$$

Одержане значення знаходиться у діапазоні від 0 до 1. Чим більше одержане значення наближається до 1, тим більша частка дисперсії враховується моделлю. Скоригований коефіцієнт детермінації (Adjusted R-Square) застосовують для забезпечення коректності порівняння моделей з різним числом факторів так, щоб число регресорів (факторів) не вплинуло на результати [11].

Радіальний згущувач є невисоким циліндричним резервуаром (3,6–4,2 м) з конічним дном і кільцевим жолобом для зливу освітленої суспензії [12]. У резервуарі встановлено ферму, на якій закріплено гребки для неперервного перемішування матеріалу, що осаджується, до розвантажувального отвору на дні конічної частини резервуару. Ферма здійснює 0,01–0,3 оберти на хвилину. Суспензія живлення неперервно надходить до середини резервуару згущувача через заглиблений живильник. Освітлена рідина переливається через поріг у кільцевий жолоб і видаляється по спеціальному трубопроводу у хвості або використовується як оборотна вода. Згущена суспензія, що утворюється із осаду, видаляється через розвантажувальні отвори і відкачується насосом.

Основним вихідним сигналом – керованою величиною для автоматичної стабілізації роботи згущувача – є густина суспензії розвантаження згущувача (або вихідна концентрація), а для оптимізації агрегату основним сигналом є густина суспензії зливу (або вихідна концентрація) [12, 13]. Основними збуреннями процесу є змінення концентрації і об'ємної витрати суспензії живлення. Як керуючі впливи зазвичай використовують змінення прохідного отвору розвантажувального клапану на виході згущеної суспензії із згущувача і витрата коагулянту.

Керування процесом згущення сформовано з використанням методу модельного прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC). MPC регулятор використовує математичну модель у такому вигляді [14, 15]

$$\begin{aligned} x_p(k+1) &= A_p x_p(k) + B S_i u_p(k) \\ y_p(k) &= S_o^{-1} C x_p(k) + S_o^{-1} D S_i u_p(k) \end{aligned} \quad (5)$$

де S_i , S_o – діагональна матриця відповідно вхідних та вихідних масштабних коефіцієнтів у технічних одиницях, x_p – вектор стану, u_p – вектор безрозмірних значень впливів керування, y_p – вектор безрозмірних значень виходу об'єкту керування. У процесі синтезу модельного прогнозного керування регулятор на кожному інтервалі керування розв'язує задачу оптимізації. Результатом розв'язання є значення керованих змінних, які будуть застосовані до об'єкта на наступному інтервалі керування.

Схема системи формування модельного прогнозного керування процесом згущення за каналом «площа отвору розвантажувального клапану – вихідна концентрація» представлена на рис. 3.

Рис. 3. Схема системи формування модельного прогнозуючого керування процесом згущення

На основі даної схеми модельного прогнозуючого керування (рис. 3) було досліджено вплив величин горизонту керування і горизонту прогнозування на якість керування процесом згущення рудної сировини. Тривалість інтервалу керування прийнято такою, що дорівнює 1 хв. Результати моделювання при різних горизонтах керування і прогнозування представлено на рис. 4. Методика дослідження полягала у тому, що при фіксованому горизонті керування (1, 2 та 5 інтервалів) задавались різні значення горизонту прогнозування (3, 5, 10 та 20 інтервалів).

Рис. 4. Вихідна змінна при різних горизонтах керування і прогнозування:

a – горизонт прогнозування – 1; *б* – горизонт прогнозування – 2; *в* – горизонт прогнозування – 5

Зведені результати розрахунків показників якості керування процесом згущення залізорудної сировини при заданих значеннях горизонту керування та горизонту прогнозування представлено у табл. 4.

Одержані результати дозволяють зробити висновок, що при формуванні модельного прогнозуючого керування для одноканальної системи керування процесом згущення (рис. 3) достатнім буде встановлення горизонту керування таким, що дорівнює 1 інтервал. За даного значення квадратична помилка змінюється у інтервалі 0,1452–0,1474. Подальше збільшення горизонту прогнозування не дозволяє суттєво зменшити квадратичну помилку керування. Водночас, достатнім значенням горизонту прогнозування буде величина 3-5 інтервалів. Такі значення обумо-

включаються тим, що зростання обчислювальної складності процесу прогнозування на 10–20 інтервалів призводить до незначного зменшення квадратичної помилки керування.

Таблиця 4

Показники якості керування процесом згущення залізорудної сировини

Горизонт керування	Горизонт прогнозування	Перерегулювання	Середня помилка	Квадратична помилка
1	3	1,2349	-0,0715	0,1474
1	5	0,005	-0,072	0,1472
1	10	0,0001	-0,0733	0,1467
1	20	0,0016	-0,0778	0,1452
2	3	1,6074	-0,0715	0,1475
2	5	0,5218	-0,0717	0,1473
2	10	0,1553	-0,0719	0,1473
2	20	0,2301	-0,0718	0,1473
5	3	1,6558	-0,0715	0,1475
5	5	0,9032	-0,0716	0,1474
5	10	0,8679	-0,0716	0,1474
5	20	0,7708	-0,0716	0,1474

Висновки та напрямки подальших досліджень. Для формування сепараційної характеристики процесу згущення рудної сировини на основі методу модельного прогнозування керування для одноканальної системи керування процесом згущення задовільні результати керування забезпечуються встановлення горизонту керування таким, що дорівнює 1 інтервал; при значенні горизонту прогнозування 3-5 інтервалів. Напрямок подальших досліджень є вивчення можливості керування процесом згущення як багатомірним об'єктом зі змінними

параметрами, що враховують, зокрема, змінення характеристик мінералого-технологічних різновидів перероблюваної залізорудної сировини.

Список літератури

1. Младецкий И К., Колесник М. В. Соотношения между крупностью вкрапления ценного компонента и необходимой крупностью помола руды // Наук. праці ДонНТУ. Серія: Гірнична електромеханіка. – Донецьк, 2007. – Вип. 15(131). – С. 104–108.
2. Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V. Clustering results dimension reduction of iron ore raw materials characteristics in the process control of its processing // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – No 1. – P. 6-9.
3. Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V. Distributed closed-loop control formation for technological line of iron ore raw materials beneficiation // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No 7. – P. 16-19.
4. Тихонов О. Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984. – 208 с.
5. Morkun V., Morkun N., Tron V., Hryshchenko S. Synthesis of robust controllers of technological units control systems of ore-dressing factory // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 1, No 2 (91). – P. 37-47.
6. Марюта А. Н., Качан Ю. Г., Бунько В. А. Автоматическое управление технологическими процессами обогащательных фабрик. – М.: Недра, 1983. – 277 с.
7. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. – М.: Недра, 1981. – 342 с.
8. Дослідження впливу динамічних ефектів високоенергетичного ультразвуку на газові бульбашки у пульпі для управління параметрами її газової фази у процесі флотації: звіт про НДР / ДВНЗ «Криворізький національний університет»; Керівник роботи Т. А. Олійник. – 0115U003053. Кривий Ріг, 2016. – 201 с.
9. Хміль І. В. Особливості технології подрібнення магнетитових кварцитів в умовах об'ємного нерівномірно-компонентного стиснення : дис. ... кандидата техн. наук: 05.15.08 / Хміль Ірина Віталіївна. – Держ. вищ. навч. закл. «Криворізь. нац. ун-т». – Кривий Ріг, 2016. – 158 с.
10. Draper N.R., Smith H. Applied regression analysis (3rd ed.). John Wiley, 1998. – 736 p.
11. Gujarati D. N., Porter D. C. Basic Econometrics (Fifth ed.). New York: McGraw-Hill/Irwin, 2009. – 922 p.
12. Автоматизация технологических процессов на горнорудных предприятиях: Справочное пособие / Под ред. В. С. Виноградова. – М.: Недра, 1984. – 167 с.
13. Моргун В. С., Моргун Н. В., Тронь В. В. Оптимальное управление процессом обогащения железной руды. – Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 321 p.
14. Bemporad A., Ricker N. L., Morari M. Model Predictive Control Toolbox User's Guide. The MathWorks, 2018. – 984 p.
15. Saraf, N., Bemporad, A. Fast model predictive control based on linear input/output models and bounded-variable least squares // IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control. – 2018. – Vol 1. – P. 1919-1924.

Рукопис подано до редакції 02.04.2019