

Н.В. Осипова, В.Т. Самойлова

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ

Приведен обзор и анализ работ по различным методам оптимизации и управления процессом магнитной сепарации железной руды. Указаны недостатки существующих способов стабилизации содержания общего и магнетитового железа в концентрате. Выделены основные факторы, определяющие качество продукции обогатительной фабрики. Выбран тип регулятора, который позволит вычислять управление по нескольким переменным, поддерживая заданную массовую долю полезного компонента в выходном продукте сепаратора.

Ключевые слова: магнитная сепарация, концентрат, хвосты, мельница, классификатор, регрессионный анализ, линейное программирование, нечеткий регулятор, корреляция.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-126-130

Технологическая оптимизация и создание систем автоматического управле-

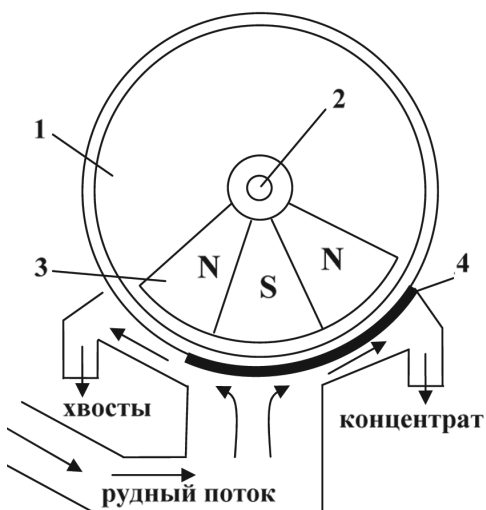


Схема магнитного сепаратора

ния обогатительными процессами являются одной из ключевых задач горнорудных предприятий. Так, нестабильность содержания железа в породе может отрицательно повлиять на окомкование, уменьшить производительность доменной печи и т.д.

Получение концентрата низкого качества технологи зачастую вынуждены компенсировать выпуском соответствующего количества продукции с повышенной долей металла [6].

Сепаратор является одним из основных аппаратов, применяемых в обогащении полезных ископаемых. Конструктивно он состоит из немагнитного барабана 1, вращающегося вокруг оси 2, внутри которого расположена система полюсов 3 с напряженностью поля в зо-

не 4. Он применяется для разделения рудного потока на две фракции по магнитной восприимчивости: хвосты и концентрат (рисунок). Эти выходные продукты характеризуются величиной массовой доли железа [3, 10–13].

Главная цель обогатительных фабрик состоит в выборе управляющих воздействий, при которых данный показатель производственного процесса достигает требуемого значения. Рассмотрим подробно различные варианты ее реализации.

В работе [3] рассмотрен подход к оптимизации технологической секции обогащения путем применения метода нелинейного программирования.

При этом возмущающими воздействиями на сепарационную систему являются содержание железа общего α_o и магнетитового α_m в исходной руде, ее твердость f , средневзвешенная крупность d .

В качестве управляющих переменных используют расход руды и воды $Q_{вм}$ в мельницу $Q_{дм}$, осуществляющий ее размол, количество воды, добавляемой в классификатор $Q_{вк}$, обеспечивающего возврат крупного класса породы обратно на доизмельчение.

К выходным параметрам процесса обогащения здесь относят содержание железа общего β_o и магнетитового β_m в концентрате и хвостах θ_o , θ_m последней стадии мокрой магнитной сепарации, выход концентрата γ , извлечение металла ε .

Для условий горно-обогатительного комбината методом регрессионного анализа определены модели статистической оптимизации вида:

$$(\gamma, \varepsilon, \theta_o, \theta_m, \beta_o, \beta_m)^T = \\ = B \cdot (\alpha_o^2, \alpha_m^2, f^2, d^2, Q_{дм}^2, Q_{вм}^2, Q_{вк}^2)^T,$$

где B — матрица коэффициентов, найденная методом наименьших квадратов.

Однако указанные уравнения носят нелинейный характер. К тому характер-

ны большие запаздывания между входом и выходом объекта, что затрудняет вывод зависимостей в режиме реального времени.

Задача синтеза системы управления технологической секцией магнитного обогащения, которая заключается в стабилизации содержания железа β в концентрате путем изменения нагрузки на секцию ΔQ , подробно изложена в [2].

В данном случае для прогнозирования выходной переменной β_{t+1} применено уравнение, полученное по результатам планирования эксперимента:

$$\beta_{t+1} = \beta_{cp} + a(\beta_t - \beta_{cp}) + b\Delta Q_t;$$

где a , b — коэффициенты линейной регрессии; β_{cp} — среднее значение содержания железа в концентрате; ΔQ_t — изменение нагрузки на секцию по исходной руде в момент времени t .

К недостаткам этого метода следует отнести большие запаздывания по времени между приложением управляющего воздействия ΔQ_t и измерением выхода β_{t+1} . К тому же вариация ΔQ_t вызовет изменение заполнения мельницы, что приведет к ее недогрузке или перегрузке.

В пособии [9] рассмотрен алгоритм процесса получения железорудного концентрата заданного качества на основе линейного программирования. В качестве факторов приняты число оборотов сепаратора n , количество твердого вещества Q_t и содержание класса крупности $-0,074$ мм в питании $g_{-0,074}$, напряженность магнитного поля H , зазор между барабаном и лотком δ .

Данный метод оптимизации требует ввода ограничений на параметры n , Q_t , H , $g_{-0,074}$, δ и предназначен, в основном, только для «ручных» расчетов. Их результат часто выходит за нужные пределы. Если границы интервала, в котором должны находиться указанные величины, изменить нельзя из-за конструктивных особенностей сепаратора, то при ре-

шении уравнений будут выбраны крайние значения, что не соответствует заданному качеству концентрата. Другой проблемой является требование линейности характеристики $\beta(n, Q, H, g_{-0.074}, \delta)$, что является выполнимым лишь в узком диапазоне регулирования.

В работе [5] приведено относительное влияние технологических факторов на процесс сепарации, таких как удельная магнитная восприимчивость обрабатываемого материала χ , напряженность магнитного поля H , коэффициент неоднородности k , диаметр зерна d , плотность пульпы ρ , глубина ванны сепаратора h , угол входа вектора скорости подачи пульпы φ .

Также известно, что в качестве воздействий, оптимизирующих β_o и β_m , могут быть выбраны напряженность магнитного поля сепаратора H , частота вращения его барабана n . К возмущениям следует отнести долю железа общего α_o и магнетитового α_m во входном потоке, ее плотность ρ , расход Q , степень раскрытия рудного материала f , удельный объемный расход пульпы на длину сепаратора q [3].

Однако в этих сведениях не указано, по какому закону осуществляется регулирование.

В диссертации [4] исследуется влияние на качество магнитной сепарации количества исходной руды в мельницу первой стадии измельчения и воды в ванну классификатора.

Для оптимизации динамических характеристик системы применен метод, позволяющий по начальным точкам переходного процесса в объекте, не дожидаясь его окончания, определить установившееся значение выходного сигнала. Поэтому время поиска экстремума многократно сокращается.

Этот алгоритм возможно применять только для объектов, представляющих идеальное инерционное звено. Из-за на-

личия циркуляционной нагрузки и возмущений модель может принять колебательный характер. К тому же данная система стабилизирует качество лишь на первой стадии мокрой магнитной сепарации.

Предложение по использованию нечеткого регулятора, который прогнозирует массовую долю железа в концентрате с целью выработки упреждающего воздействия для поддержания заданной плотности пульпы на сливе классификатора, нашло отражение в научном исследовании [1].

Изменение физико-механических свойств потребуют перенастройки нечеткого регулятора, что будет затруднено из-за большого запаздывания.

В статье [8] разработана функциональная схема и алгоритм автоматической оптимизации, которые позволяют в зависимости от коэффициента корреляции между содержанием железа в концентрате β_m и хвостах θ_m , изменять задание по плотности слива классификатора.

Данный способ управления затрудняет промышленное использование, так как параметры β_m и θ_m могут быть взаимно некоррелированы.

Подводя итоги выше сказанному, можно выделить в перспективе основные направления дальнейшего совершенствования методов оптимизации и систем автоматического управления магнитной сепарацией:

- выбор факторов, оказывающих влияния на указанный процесс, путем проведения эксперимента;
- построение математической модели, отражающей динамику качественных показателей β_o и β_m , при подаче управляющих воздействий, отобранных по результатам исследований;
- на ее основе произвести расчет параметров регулятора, который позволит стабилизировать β_o и β_m в пределах допустимых значений.

Наиболее перспективно регулирование расхода воды в ванну сепаратора Q_v , напряженности поля H , частоты его оборотов n , зазора между барабаном и лотком δ . При этом между приложением входного воздействия и измерением выходного параметра отсутствует запаздывание, а постоянная времени не превышает 10 с [3].

Поскольку функционирование объекта определяется несколькими факторами, то для оптимизации можно исполь-

зовать метод аналитического конструирования регулятора [7]. Он позволит одновременно вычислить допустимое управление по всем переменным Q_v , H , n и δ на основе данных наблюдения параметров β_o и β_m .

Применение САУ магнитным сепаратором в составе АСУ ТП горных предприятий существенно повысит его производительность, а также в значительной мере снизит удельные энергозатраты при эксплуатации обогатительного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борщ Т. В. Нечеткий регулятор массовой доли железа в концентрате по сигналу магнитной индукции в рабочей зоне сепаратора // Научный вестник НГУ. — 2013. — № 4. — С. 90—94.
2. Виноградов С. В. Автоматизация технологических процессов горного производства. — М.: Недра. — 1984. — 167 с.
3. Марюта А. Н., Качан Ю. Г., Бунько В. А. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1983. — 277 с.
4. Моркун Н. В. Адаптивная система управления процессом магнитной сепарации железных руд на базе средств ультразвукового контроля: Дис. ... канд. техн. наук. — Кривой Рог: Криворожский технический университет, 2005. — 188 с.
5. Нестеров Г. С. Технологическая оптимизация обогатительных фабрик. — М.: Недра, 1976. — 120 с.
6. Бикбов М. А., Самохвалов И. П. Патент РФ № 2324541, 20.05.2008. Способ управления процессом обогащения железных руд. — 2008. Бюл. № 14.
7. Певзнер Л. Д. Теория систем управления. — СПб.: Изд-во «Лань», 2013. — 440 с.
8. Убай Юсеф Саламах Аль Мададха. Система автоматической оптимизации крупности помола руды в замкнутом цикле измельчения // Научный вестник НГУ. [Электронный ресурс]. URL: <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/81/19.pdf> (дата обращения: 30.05.2017).
9. Щупов Л. П. Прикладные математические методы в обогащении полезных ископаемых. — М.: Недра, 1972. — 168 с.
10. Alok Tripathya, Subhankar Bagchia, Biswala S. K., Meikap B. C. Study of particle hydrodynamics and misplacement in liquid-solid fluidized bed separator // Chemical Engineering Research and Design. 2017. vol. 117, pp. 520—532.
11. Xiong D., Lu L., Holmes R. J. Developments in the physical separation of iron ore: magnetic separation // Iron Ore Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. 2015, pp. 283—307.
12. Charikinyaa E., Robertsona J., Plattsa A., Beckera M., Lambergc P., Bradshawa D. Integration of mineralogical attributes in evaluating sustainability indicators of a magnetic separator // Minerals Engineering. 2017. vol. 107, pp. 53—62.
13. Xianlin Zhou, Deqing Zhu, Jian Pan, Yanhong Luo and Xinqi Liu. Upgrading of high-aluminum hematite-limonite ore by high temperature reduction-wet magnetic separation process // Metals. 2016. vol. 57, no 6, pp. 1—12. **PLoS**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Осипова Нина Витальевна¹ — кандидат технических наук, доцент,
e-mail: nvo86@mail.ru,

Самойлова Вероника Тимуровна¹ — магистрант, e-mail: nika_samojlova@mail.ru,

¹ НИТУ «МИСиС».

N.V. Osipova, V.T. Samoylova

REVIEW OF THE METHODS OF PROCESS OPTIMIZATION AND CONTROL OF MAGNETIC SEPARATION OF IRON ORE

The article presents a review and analysis papers on various optimization techniques and process control magnetic separation iron ore. The drawbacks of the existing methods stabilization content total and magnetite iron in concentrate. The main factors that determine the quality of the product processing plant. The selected type of controller, which will calculate control several variables on the maintain mass fraction of useful component in the output product separator.

Key words: magnetic separation, concentrate, tailings, mill, classifier, regression analysis, linear programming, fuzzy logic controller, correlation.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-126-130

AUTHORS

Osipova N.V.¹, Candidate of Technical Sciences,

Assistant Professor, e-mail: nvo86@mail.ru,

Samoylova V.T.¹, Master's Degree Student,

e-mail: nika_samojlova@mail.ru,

¹ National University of Science and Technology «MISIS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Borshch T.V. *Nauchnyy vestnik NGU*. 2013, no 4, pp. 90–94.
2. Vinogradov S.V. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov gornogo proizvodstva* (Automation of process flows in mining), Moscow, Nedra, 1984, 167 p.
3. Maryuta A. N., Kachan Yu. G., Bun'ko V. A. *Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami obogatitel'nykh fabrik*: Uchebnik dlya vuzov (Automated control of process flows at processing plants: Textbook for high schools), Moscow, Nedra, 1983, 277 p.
4. Morkun N.V. *Adaptivnaya sistema upravleniya protsessom magnitnoy separatsii zheleznykh rud na baze sredstv ul'trazvukovogo kontrolya* (Adaptable control of magnetic separation of iron ore using ultrasonic inspection equipment), Candidate's thesis, Krivoy Rog, KTU, 2005, 188 p.
5. Nesterov G.S. *Tekhnologicheskaya optimizatsiya obogatitel'nykh fabrik* (Process-oriented optimization of beneficiation plants), Moscow, Nedra, 1976, 120 p.
6. Bikbov M. A., Samokhvalov I. P. *Patent RU 2324541*, 20.05.2008.
7. Pevzner L. D. *Teoriya sistem upravleniya* (Theory of control systems), Saint-Petersburg, Izd-vo «Lan», 2013, 440 p.
8. Ubay Yusef Salamakh Al' Madadkha. *Nauchnyy vestnik NGU*, available at: <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/81/19.pdf> (accessed 30.05.2017).
9. Shchupov L.P. *Prikladnye matematicheskie metody v obogashchenii poleznykh iskopaemykh* (Applied mathematical methods in mineral dressing), Moscow, Nedra, 1972, 168 p.
10. Alok Tripathya, Subhankar Bagchia, Biswala S. K., Meikap B. C. Study of particle hydrodynamics and misplacement in liquid–solid fluidized bed separator. *Chemical engineering research and design*. 2017. vol. 117, pp. 520–532.
11. Xiong D., Lu L., Holmes R.J. Developments in the physical separation of iron ore: magnetic separation. *Iron ore mineralogy, processing and environmental sustainability*. 2015, pp. 283–307.
12. Charikinyaa E., Robertsona J., Plattsa A., Beckera M., Lambergc P., Bradshawa D. Integration of mineralogical attributes in evaluating sustainability indicators of a magnetic separator. *Minerals engineering*. 2017. vol. 107, pp. 53–62.
13. Xianlin Zhou, Deqing Zhu, Jian Pan, Yanhong Luo and Xinqi Liu. Upgrading of high-aluminum hematite-limonite ore by high temperature reduction-wet magnetic separation process, *Metals*. 2016. vol. 57, no 6, pp. 1–12.