

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ / METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.4>

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Научная статья

Дюнова Д.Н.^{1*}, Нурмагомедов Т.Н.²

¹ORCID : 0000-0002-0707-5334;

^{1,2} Академия гражданской защиты МЧС России, Химки, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (dunova_dn[at]mail.ru)

Аннотация

Современные гидрометаллургические комплексы представляют собой сложные многоаппаратные производственно-технологические системы, в которых реализуется определенная последовательность технологических операций. Успешное решение задач исследования режимов функционирования всей совокупности аппаратов объектов выделенного класса возможно на основе их математического описания. Важным аспектом при этом является необходимость учета причинно-следственных связей между параметрами объекта. В статье рассматриваются особенности создания статической математической модели производственно-технологического комплекса выщелачивания цинковых огарков на основе применения методов теории сигнальных графов, существенно упрощающих определение функциональных зависимостей между параметрами.

Ключевые слова: цветная металлургия, производство цинка, статические модели, сигнальный граф.

MODELLING OF COMPLEX TECHNOLOGICAL SCHEMES OF HYDROMETALLURGICAL PRODUCTION COMPLEXES

Research article

Dyunova D.N.^{1*}, Nurmagomedov T.N.²

¹ORCID : 0000-0002-0707-5334;

^{1,2} Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

* Corresponding author (dunova_dn[at]mail.ru)

Abstract

Modern hydrometallurgical complexes are complex multi-apparatus operational and technological systems in which a certain sequence of technological operations is implemented. Successful solution of the research problems of functioning modes of the whole set of objects of the selected class is possible on the basis of their mathematical description. An important aspect in this case is the necessity to consider the cause-effect relations between the object parameters. The article describes the specifics of creating a static mathematical model of zinc cinder leaching production and technological complex based on the application of methods of signal graph theory, which significantly simplifies the determination of functional dependencies between the parameters.

Keywords: non-ferrous metallurgy, zinc production, static models, signal graph.

Введение

Современное производство цинка представляет собой крупную технологическую и технико-экономическую структуру с полным циклом получения товарной продукции. Целью его функционирования является получение высококачественной и конкурентоспособной металлопродукции, обеспечение результативности смежных отраслей промышленности, ресурсосбережение и экологическая безопасность.

Гидрометаллургический способ производства цинка, являющийся основным в настоящее время, обеспечивает полное и комплексное использование сырья, высокое качество получаемого металла. Наибольшее распространение получила структура цинкового производства в виде основной и вспомогательной линий технологических переделов. Комплекс технологических переделов основного производства включает обжиг сульфидных цинковых концентратов, выщелачивание огарка и сгущение пульпы, очистку цинксульфатных растворов от примесей, электролиз цинковых растворов. Вспомогательное производство составляют процессы вельцевания цинковых кеков и их гидрометаллургическая переработка.

Выщелачивание огарка – основной гидрометаллургическая операция, которая в значительной степени определяет все основные технико-экономические показатели производства цинка. Данный передел характеризуется наибольшим многообразием технологических решений, различающихся количеством стадий, режимами переработки сырья, видами применяемого типового и специализированного оборудования.

Перерабатываемым сырьем являются сульфидные цинковые концентраты, различие составов которых объясняется генезисом руд и зависимостью от степени взаимной вкрапленности минералов [1], [2], [3].

По характеру внутренних и внешних технологических связей выщелачивательный передел – сложная производственная система. Практически управление подобными объектами осуществляется в условиях неопределенности, вызванной их стохастической природой, колебаниями составов сырья и оборотных потоков

технологических сред, нестабильностью рабочих режимов, флуктуацией параметров. Все это чрезвычайно осложняет формирование единого подхода к анализу объектов рассматриваемого класса и управления ими [4].

Необходимым условием успешного решения указанных задач является создание математического описания объекта исследования. Изучение принципов управления процессами сложных технологических комплексов показало доминирующее положение статических моделей, включающих в явном или неявном виде соотношения, описывающие закономерности протекания процессов. Преимущество их использования связано с возможностью непрерывного получения значений выходных и промежуточных показателей процессов, быстрого определения управляющих воздействий, решения задач прогнозирования. С помощью моделей статики ставятся и успешно решаются задачи исследования закономерностей процессов, поиска оптимальных технологических режимов и конструктивных элементов оборудования, задачи оперативного определения технико-экономических показателей.

Для описания многостадийных и многоаппаратных процессов выщелачивательного передела распространение получили физические модели [5], а также математические модели «общего материального баланса», «раздельных потоков», а также модели в виде «кинетических функций» [6]. Различающиеся концептуально предложенные формализованные описания исследуемого объекта не позволяют оценивать качество его функционирования на каждой стадии. Математическая модель расчета каскада реакторов нейтрального и кислого выщелачивания, учитывающая влияние основных параметров технологических аппаратов, перерабатываемого сырья и кинетику процесса в каждой ступени на эффективность процесса в целом, предложенная в [7], позволяет определять параметры исключительно для расчета мощности на перемешивание в каждой ступени каскада. Для управления качеством функционирования передела предложена регрессионная модель, позволяющая идентифицировать области повышенного качества объекта [8]. Связи между элементами сложных производственно-технологических систем также могут быть описаны методами сетевого планирования, теории массового обслуживания, сетей Петри и т.д.

В настоящей работе предложена математическая модель выщелачивательного передела в производстве цинка, аналитически описывающая статический режим его функционирования, полученная на основе применения математических методов теории сигнальных графов.

Основная часть

В мировой практике гидрометаллургии цинка распространение получила двухстадийная схема переработки обожженного концентрата в непрерывном режиме. Цель выщелачивания – по возможности более полное извлечение в раствор цинка и сопутствующих ему ценных компонентов при минимальном загрязнении примесями, осложняющими функционирование последующих переделов [2], [5].

Естественная декомпозиция исследуемого передела позволяет выделить процессы нейтральной и кислой классификации, процесс нейтрального выщелачивания и сгущения, процесс кислого выщелачивания и сгущения. Здесь последовательно на каждой стадии формируется химический состав раствора, поступающего на электролиз (рис. 1).

Принцип последовательного расположения технологических операций передела нарушает совокупность оборотных материальных потоков, применяемых с целью наиболее полного использования сырья и создания эффективных режимов его переработки [9].

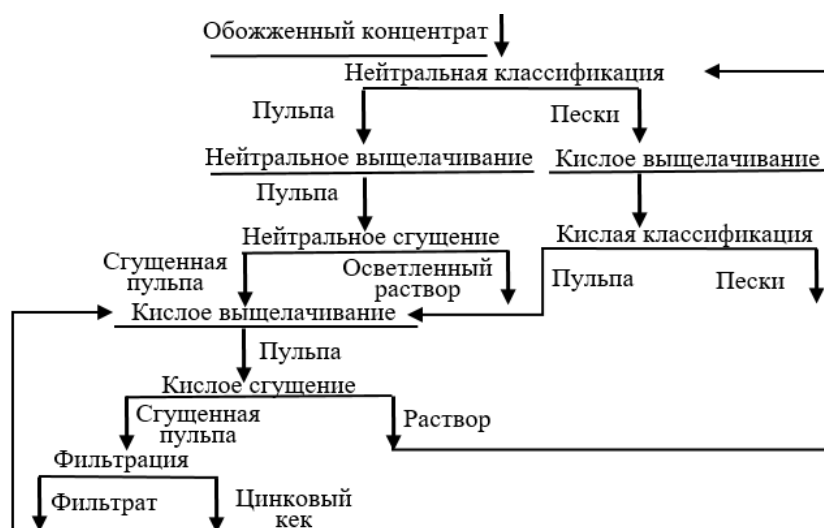


Рисунок 1 - Технологическая схема выщелачивательного передела

Технологической топологии выщелачивательного передела можно поставить в соответствие сигнальный граф, элементами которого являются вершины, отвечающие операциям (сигналам) схемы и ветви, устанавливающие связь между операциями (рис. 2).

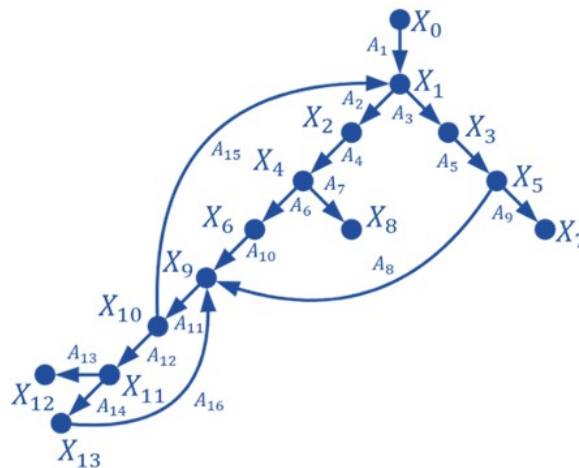


Рисунок 2 - Сигнальный граф выщелачивательного передела

В соответствии с [10], [11], [12] решение графа сводится к определению коэффициента передачи (передаточной функции) от начальной до конечной операции.

В общем случае для сигнального графа определение коэффициента передачи от источника к стоку сигнального графа осуществляют по формуле Мейсона [13]:

$$T_{is}(p) = \frac{\sum_{j=1}^n P_j(p) \Delta_j(p)}{\Delta_j(p)} \quad (1)$$

где p – оператор Лапласа; $P_j(p)$ – передача j -го прямого пути от источника i к стоку s ; n – число прямых путей; Δ – определитель сигнального графа; Δ_j – минор определителя графа, значение которого равно значению определителя Δ для подграфа, не касающегося j -го прямого пути.

Величина Δ описывается соотношением [9]:

$$\Delta = 1 - \sum L_{m1} + \sum L_{m2} - \sum L_{m3} + \dots, \quad (2)$$

где $\sum L_{m1}$ – сумма передач всех контуров и петель обратной связи сигнального графа; $\sum L_{mr}$ – произведение передач m -ой возможной комбинации передач из r непересекающихся контуров и петель обратной связи ($r \geq 2$).

Решение сигнального графа предусматривает применение его топологических элементов (прямого пути и контура). Прямой путь P_j – путь от источника к стоку графа вдоль его ветвей, при котором ни одна из вершин не встречается более одного раза. Контур L_j – замкнутый путь вдоль ветвей графа, при котором каждый узел встречается только по одному разу.

Анализ топологических особенностей сигнального графа исследуемого процесса позволил получить статическую модель исследуемого объекта:

$$X_7 = \frac{X_0 P_1 (1 - L_2)}{1 - (L_1 + L_2 + L_3)}, \quad (3)$$

$$X_8 = \frac{X_0 P_2 (1 - L_2)}{1 - (L_1 + L_2 + L_3)}, \quad (4)$$

$$X_{12} = \frac{X_0 P_3}{1 - (L_1 + L_2 + L_3)}. \quad (5)$$

Принимая, например, в качестве основного параметра содержание цинка, можно показать, что X_0 – содержание цинка в огарке, X_7 – содержание цинка в продукте (песках) кислой классификации, X_{12} – содержание цинка в кеке. Учитывая, что каждой операции передела отвечает соответствующий коэффициент передачи A_i , математическая модель объекта принимает вид:

$$X_7 = \frac{X_0 A_1 A_3 A_5 A_9 (1 - A_{11} A_{12} A_{14} A_{16})}{1 - (A_3 A_5 A_8 A_9 A_{11} A_9 A_{15} + A_{11} A_{12} A_{14} A_{16} + A_2 A_4 A_6 A_{10} A_{11} A_{15})}, \quad (6)$$

$$X_8 = \frac{X_0 A_1 A_2 A_4 A_7 (1 - A_{11} A_{12} A_{14} A_{16})}{1 - (A_3 A_5 A_8 A_9 A_{11} A_9 A_{15} + A_{11} A_{12} A_{14} A_{16} + A_2 A_4 A_6 A_{10} A_{11} A_{15})}, \quad (7)$$

$$X_{12} = \frac{X_0 A_1 A_2 A_4 A_6 A_{10} A_{11} A_{12} A_{13}}{1 - (A_3 A_5 A_8 A_9 A_{11} A_9 A_{15} + A_{11} A_{12} A_{14} A_{16} + A_2 A_4 A_6 A_{10} A_{11} A_{15})}. \quad (8)$$

Соотношения (6) – (9) позволяют на основе информации о содержании цинка в огарке прогнозировать извлечение цинка в нейтральном растворе, песках кислой классификации, цинковом кеке на основе известных коэффициентов передачи.

Заключение

Представление технологической топологии выщелачивательного передела в виде ориентированного сигнального графа, позволило получить наглядное математическое описание исследуемого объекта, устанавливающего причинно-следственные между его параметрами.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Казанбаев Л.А. Гидрометаллургия цинка / Л.А. Казанбаев — М.: Руда и Металлы, 2006. — 176 с.
2. Снурников А.П. Гидрометаллургия цинка / А.П. Снурников — М.: Metallurgia, 1981. — 384 с.
3. Дюнова Д.Н. Математическая модель процесса нейтрального выщелачивания и сгущения в производстве цинка. / Д.Н. Дюнова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». — 2013. — 1. — с. 40-45.
4. Дюнова Д.Н. О принципах построения эффективных систем управления сложными производственно-технологическими системами. / Д.Н. Дюнова // Современные проблемы цивилизации и устойчивого развития в информационном обществе; — М.: ИРОК, 2022. — с. 188-191.
5. Белоглазов И.Н. Основы расчета фильтрационных процессов / И.Н. Белоглазов — М.: Руда и металлы, 2002. — 210 с.
6. Головкин Ф.П. Автоматизация непрерывных технологических процессов / Ф.П. Головкин // Материалы VII всероссийской конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах»; — СПб: Издательство СПбГТУ, 2002. — с. 92-93.
7. Болотаева И.И. Моделирование процесса сгущения. / И.И. Болотаева // Труды молодых ученых. — 2005. — 1. — с. 52-87.
8. Дюнова Д.Н. Анализ надежности технологической топологии процесса кислого выщелачивания гидрометаллургического производства цинка. / Д.Н. Дюнова // Теоретическая и прикладная наука; — Тараз: International Academy of Theoretical & Applied Sciences, 2022. — с. 248-251.
9. Кафаров В.В. Принципы математического моделирования химико-технологических систем / В.В. Кафаров — М.: Химия, 1974. — 440 с.
10. Уткин Н.И. Metallurgia цветных металлов / Н.И. Уткин — М.: Metallurgia, 1985. — 440 с.
11. Берж К. Теория графов и ее применения / К. Берж — М.: Наука, 1962. — 319 с.
12. Белов В.В. Теория графов / В.В. Белов — М.: Высшая школа, 1975. — 392 с.
13. Бояринов А.И. Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов — М.: Химия, 1969. — 495 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kazanbaev L.A. Gidrometallurgiya cinka [Hydrometallurgy of Zinc] / L.A. Kazanbaev — M.: Ruda i Metally', 2006. — 176 p. [in Russian]
2. Snurnikov A.P. Gidrometallurgiya cinka [Hydrometallurgy of Zinc] / A.P. Snurnikov — M.: Metallurgiya, 1981. — 384 p. [in Russian]
3. Dyunova D.N. Matematicheskaya model' processa nejtral'nogo vysshelachivaniya i sgushheniya v proizvodstve cinka [Mathematical Model of the Neutral Leaching and Thickening Process in Zinc Production]. / D.N. Dyunova // Vestnik YuUrGU. Seriya «Metallurgiya» [Bulletin of SUSU. Metallurgy Series]. — 2013. — 1. — p. 40-45. [in Russian]
4. Dyunova D.N. O principax postroeniya e'ffektivny'x sistem upravleniya slozhny'mi proizvodstvenno-technologicheskimi sistemami [On the Principles of Building Effective Management Systems for Complex Production and Technological Systems]. / D.N. Dyunova // Modern Problems of Civilization and Sustainable Development in the Information Society; — M.: IROK, 2022. — p. 188-191. [in Russian]
5. Beloglazov I.N. Osnovy' rascheta fil'tracionny'x processov [Fundamentals of Filtration Processes Calculation] / I.N. Beloglazov — M.: Ruda i metally', 2002. — 210 p. [in Russian]
6. Golovko F.P. Avtomatizatsiya neprerivnykh tekhnologicheskikh protsessov [Automation of Continuous Technological Processes] / F.P. Golovko // Proceedings of the VII All-Russian Conference "Fundamental Research in Technical Universities"; — SPb: SPbSTU Publishing House, 2002. — p. 92-93. [in Russian]
7. Bolotaeva I.I. Modelirovanie processa sgushheniya [Simulation of the Thickening Process]. / I.I. Bolotaeva // Trudy molody'x ucheny'x [Works of Young Scientists]. — 2005. — 1. — p. 52-87. [in Russian]
8. Dyunova D.N. Analiz nadezhnosti tekhnologicheskoy topologii processa kislogo vysshelachivaniya gidrometallurgicheskogo proizvodstva cinka [Reliability Analysis of Process Topology of Acid Leaching Process of Hydrometallurgical Zinc Production]. / D.N. Dyunova // Theoretical & Applied Science; — Taraz: International Academy of Theoretical & Applied Sciences, 2022. — p. 248-251. [in Russian]
9. Kafarov V.V. Principy matematicheskogo modelirovaniya ximiko-technologicheskix sistem [Principles of Mathematical Modeling of Chemical and Technological Systems] / V.V. Kafarov — M.: Ximiya, 1974. — 440 p. [in Russian]
10. Utkin N.I. Metallurgiya czvetny'x metallov [Non-Ferrous Metals Metallurgy] / N.I. Utkin — M.: Metallurgiya, 1985. — 440 p. [in Russian]
11. Berzh K. Teoriya grafov i ee primeneniya [Graph Theory and its Applications] / K. Berzh — M.: Nauka, 1962. — 319 p. [in Russian]

12. Belov V.V. Teoriya grafov [Graph Theory] / V.V. Belov — М.: Vysshaya shkola, 1975. — 392 p. [in Russian]
13. Boyarinov A.I. Metody' optimizacii v khimicheskoy tekhnologii [Optimization Methods in Chemical Technology] / A.I. Boyarinov — М.: Khimiya, 1969. — 495 p. [in Russian]