

К вопросу о инициализации кинетических моделей флотационного обогащения черносланцевого сырья

Ромашев Артём Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры Обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

Калмыкова Татьяна Дмитриевна – студент кафедры Обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

Управителева Анна Андреевна – студент кафедры Обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

Аннотация: Данная научная работа посвящена систематизации и обобщению существующих подходов к моделированию кинетики флотации и инициализации вида функции полученной при сепарации полиминерального сырья. В ходе выполнения работы были проведены: литературный обзор по теме исследования, опыты флотации черносланцевого сырья, статистическая обработка полученных результатов, расчет коэффициентов и сравнительный анализ полученных моделей.

В результате литературного обзора было установлено, что все предлагаемые модели могут быть разделены на две группы, отличающиеся подходом к созданию моделей. Модели первой группы основываются на физико-химических аспектах протекания флотационного акта. Модели второй группы являются эмпирическими и, как правило, учитывают только время протекания процесса. Для инициализации вида модели, были проведены опыты флотационного обогащения черносланцевого сырья. Опыты флотации проводились в лабораторной флотомашине с отбором концентратного продукта через пять временных интервалов. Полученные данные по извлечению зольного продукта подвергались статистической обработке с целью нахождения неизвестных коэффициентов модели К.Ф. Белоглазова и уравнений интегрального метода с порядками от 0,5 до 2. Так же исследовалась возможность подбора регрессионной модели с использованием специализированных компьютерных пакетов. В качестве критерия отбора наиболее оптимальной функции был выбран коэффициент детерминации и значения стандартной ошибки. При близких значениях показателей статистические модели сравнивались по информационному критерию Акаике.

Ключевые слова: Черные сланцы, кинетика флотации, моделирование, регрессия, уравнение Белоглазова.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование кинетики флотации является одной из главных задач в теории и практике современного обогащения, которой посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных исследователей [1-4], предлагающих теоретические и эмпирические зависимости для определения качественно-количественных характеристик флотационного разделения. На данный момент универсальной модели, удовлетворительно описывающей протекание процесса не существует, ввиду наличия многих влияющих факторов [5].

Обзор материалов по тематике исследований позволил условно выделить две группы моделей: фундаментальные (основанные на физико-химических аспектах протекания флотационного акта); эмпирические (полученные для конкретных данных путем регрессионной обработки). Модели первой группы часто требуют определения одного (модель Белоглазова [6] и др.), двух (модели Klimpel, Kelsall [7-8] и др) и более (Гамма модель [9]) дополнительных параметров процесса, что вызывает трудности при расчетах. Модели второй группы удобны для практического применения, так как не требуют проведения дополнительных замеров, но коэффициенты в данных уравнениях лишены какого-либо физического смысла.

Одним из основных законов, применяемых при выводе уравнения кинетики флотации, является закон действия масс. На основе этого закона К.Ф. Белоглазовым была предложена модель, представляющая собой экспоненциальную функцию и с порядком равным единице [6]:

$$\varepsilon = 1 - e^{-kt}$$

где k – константа, учитывающая свойства аппарата, концентрацию флотореагента, характер движения частиц и пузырьков (константа скорости); ε – выход минерала в концентрат (извлечение).

Из достоинств данной модели следуют отметить легкость нахождения константы k путем линеаризации полученных зависимостей. Недостатком данного уравнения является то, что оно было выведено для мономинеральной и монодисперсной суспензии при условии постоянности ее флотируемости, что приводит к существенному различию между экспериментальной и теоретической кривыми.

Среди альтернативных подходов хорошие результаты сходимости показывает т.н. интегральный метод обработки экспериментальных данных. Этот метод предусматривает определение вида кинетических уравнений в форме зависимости извлечения от времени, по аналогии с кинетикой химической реакции [10].

Построение эмпирических моделей удобно осуществлять в специализированных программах (CurveExpert, DataFit, Minitab и т.д. [11]). Такие программы, как правило, содержат базу моделей, что позволяет осуществлять быструю автоматическую обработку опытных данных. Как правило наиболее точными, со статистической точки зрения, являются полиномы высоких порядков, но они не отражают физическую сущность моделируемого процесса и их использование для прогнозирования результатов, даже внутри рассматриваемого диапазона может привести к существенным ошибкам.

Целью данной работы являлась попытка обобщения существующих подходов и инициализация вида функции кинетики флотации. При этом последовательно решались следующие задачи: литературный обзор по теме исследования, проведение опытов флотации, статистическая обработка полученных результатов, расчет коэффициентов и сравнительный анализ полученных моделей.

Методы

В качестве объекта исследования были отобраны две представительные пробы диктионемовых сланцев (Ленинградская обл.). Выбор сланцев, как объекта исследований обусловлен важностью данного объекта, как источника стратегических металлов, таких как благородные, редкие, рассеянные и цветные металлы [12-14].

Схема проведения исследования приведена на рис. 1. Опыты проводились на лабораторной флотомашине. В качестве флотационных реагентов использовались: Na_2CO_3

3
, Na
2
SiO
3
, керосин, МИБК. Временные промежутки контрольных отборов составили 1, 3, 7, 12 и 30 мин от начала процесса.

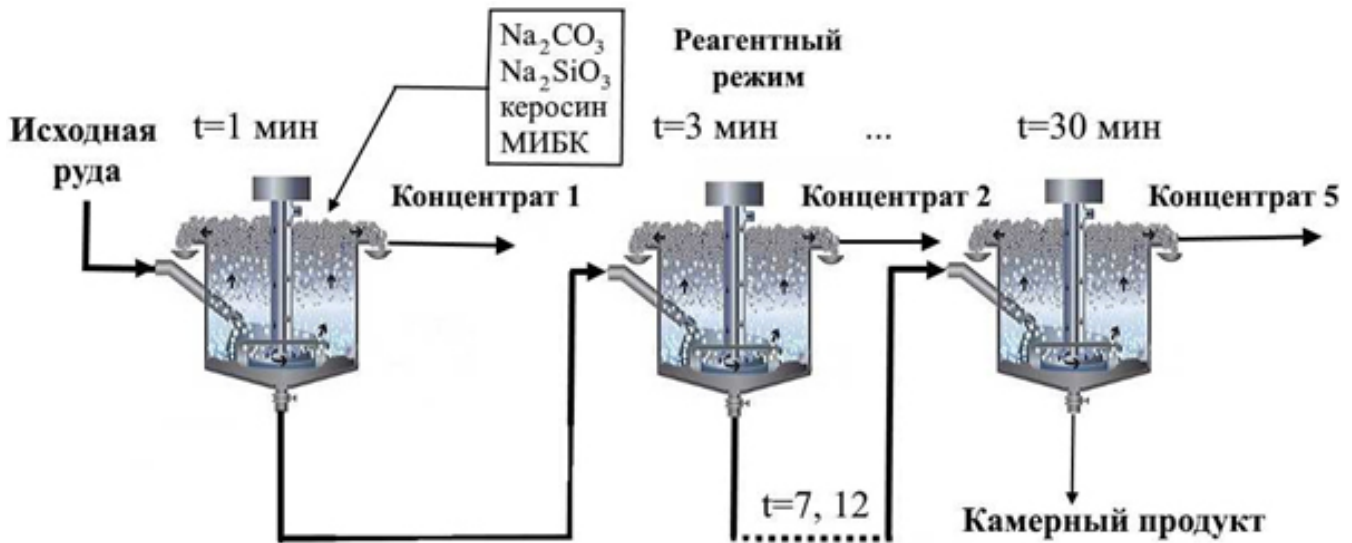


Рисунок 1. Схема проведения опыта по кинетике флотации черносланцевого сырья.

Результаты и обсуждения

По форме полученных кинетических зависимостей, сложно сделать вывод о виде кинетической зависимости. Для инициализации вида модели по полученным данным последовательно определялись константы для уравнения К.Ф. Белоглазова, константы моделей при интегральном методе обработки, а также применялось специализированное программное обеспечение для подбора регрессионной зависимости. В качестве критерия отбора оптимальной функции был выбран коэффициент детерминации – R². Использование данного параметра в качестве критерия отбора допустимо, ввиду наличия в рассматриваемых функциях только одного предиктора – времени флотации t.

Опытные и смоделированные данные представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1. Результаты опытов и расчета по кинетическим моделям.

№

t, сек

ξ , %

Кинетические модели

Модель К.Ф. Белоглазова

Кривая Ноерл

Интегральный метод: порядок

0,5

1

1,5

2

1

60

13,58

4,32

14,07

19,48

15,26

13,74

13,48

2

180

28,08

12,40

27,25

26,30

25,88

27,39

29,39

β

420

42,47

26,58

43,10

36,24

38,88

42,20

44,35

4

720

55,07

41,13

54,85

46,49

50,38

53,04

52,74

5

1800

67,90

73,40

67,91

77,13

78,25

72,37

62,71

R^2

0,809

0,999

0,886

0,965

0,997

0,998

Стандартная ошибка

10,842

0,08

$\Phi,7$

$\Phi,14$

$\Phi,03$

$\Phi,01$

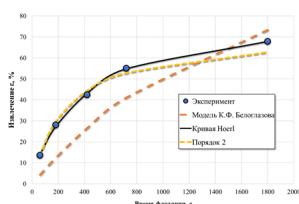


Рисунок 2. Результаты проведенных опытов и смоделированные зависимости.

По данным таблицы 1 видно, что уравнение Белоглазова не удовлетворительно описывает зависимость извлечения и непригодно для прогнозирования показателей. Стоит отметить, что значения $R^2=0,809$ удалось добиться путем минимизации квадратов отклонений с использованием симплекс-метода поиска решений. Определение коэффициента k , как тангенса угла наклона линеаризованной зависимости приводило к уменьшению точности и ухудшению статистических показателей, что свидетельствует об отклонении экспериментальной зависимости от формы кривой предполагаемой моделью.

Применение интегрального метода обработки данных позволило увеличить точность

прогнозирования по сравнению с «классической» моделью. Рост порядка кинетического уравнения приводит к возрастанию коэффициента детерминации на 0,112 с одновременным уменьшением стандартной ошибки до 0,01, но как видно из рис. 2 при увеличении времени флотирования разница между экспериментальными данными и регрессионной кривой возрастает, а погрешность превышает уровень в 5% (время $t=1800$ сек), что может привести к ошибкам прогнозирования и занижению извлечения ценного компонента.

Наилучшие результаты были достигнуты при использовании специализированных пакетов, осуществляющих регрессионную обработку. При анализе данных из перебора были исключены полиномы высоких степеней (более 2), так как несмотря на высокий коэффициент детерминации таких моделей, кривая имеет «синусоидальный» вид на и не может быть использована для прогнозирования. Для подбора наиболее подходящего уравнения были проанализированы более 67 моделей. Отбор моделей происходил по величине коэффициента детерминации и стандартной ошибке. При близких значениях показателей статистические модели сравнивались по информационному критерию Акаике. Из рассмотренных моделей наибольшую точность показала модель Hoerl:

$$\varepsilon = a \cdot b^t \cdot t^c$$

Коэффициенты найденной модели $a=1,05$; $b=0,9996$; $c= 0,6389$. Коэффициент детерминации – 0,99; стандартная ошибка – 0,833. Форма кривой не имеет ярко выраженных перегибов и изломов между точками и соответствует физической сущности протекания реального процесса.

Заключение

В результате выполненного исследования были инициализированы кинетические кривые флотационного разделения черносланцевого сырья. Установлено, что несмотря на высокий коэффициент детерминации (по шкале Чеддока) использование модели Белоглазова плохо пригодно для точного прогнозирования флотации полиминерального сырья. Весьма высокие показатели дало использование интегрального метода обработки. Метод позволяет существенно повысить точность моделирования используя при этом сравнительно простую методику расчета. Наиболее точную модель удалось получить при использовании специализированного программного обеспечения и перебора возможных моделей по базе данных. С практической точки зрения наиболее «удобным» следует признать интегральный метод, точность которого может быть повышена разбиением полученной кривой на участки, каждый из которых может быть

описан своей зависимостью.

Благодарности

Работа выполнена под руководством зав. каф. ОПИ Горного Университета, д.т.н., проф. Александровой Татьяны Николаевны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-05-00460 А).

Список литературы

1. Белоглазов И. Н. Уравнение кинетики флотационного процесса // Записки горного института. – 2008 – №177 – с. 129-132.
2. Vinnett, L., Alvarez-Silva, M., Jaques, A., Hinojosa, F., Yianatos, J. Batch flotation kinetics: Fractional calculus approach // Minerals Engineering, 2015, 77, pp. 167-171. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.03.020.
3. Albijanic, B., Subasinghe, N., Park, C.H. Flotation kinetic models for fixed and variable pulp chemical conditions // Minerals Engineering, 2015, 78, pp. 66-68. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.04.010.
4. Bu, X., Xie, G., Peng, Y., Ge, L., Ni, C. Kinetics of flotation. Order of process, rate constant distribution and ultimate recovery // Physicochemical Problems of Mineral Processing, 53 (1), 2017, pp. 342-365. DOI: 10.5277/ppmp170128.
5. Рубинштейн Ю.Б. Кинетика флотации / Ю.Б. Рубинштейн, Ю.А. Филипов // М.: Недра, 1980.3.
6. Белоглазов К. Ф. Кинетика флотационного процесса //Тезисы докладов сессии по физико-химическим проблемам обогащения. М.: Metallurgizdat, 1938.
7. Kelsall, D. F. Application of probability assessment of flotation systems // Transactions, American Society of Mining and Metallurgical Engineers, 1961, 70, pp. 191–204.
8. Klimpel, R. R., 1980. Selection of chemical reagents for flotation. In: A. Mular, R. Bhappu Eds., Mineral Processing Plant Design, 2nd edition. SME, Littleton, CO, pp. 907–934.
9. Loveday, B.K., 1966. Analysis of froth flotation kinetics // Transactions, American Society of Mining and Metallurgical Engineers, 1966, 75, pp. C219-C225.
10. Amelunxen, P., Runge, K. Innovations in froth flotation modeling // Mineral Processing and Extractive Metallurgy: 100 Years of Innovation, 2014, pp. 177-192.
11. Александрова Т. Н., Арустамян К. М., Романенко С. А. Применение математических методов анализа при оценке мировой практики селективной флотации медно-цинковых и колчеданно-полиметаллических руд //Обогащение руд. – 2017. – №. 5. – С. 21-27.

12. Александрова Т. Н., Панова Е.Г. Технологические аспекты извлечения благородных и редких металлов из углеродсодержащих пород //Записки Горного института. – 2016. – Т. 217. – С. 72-79.

13. Aleksandrova, T.N., Nikolaeva, N.V., Potemkin, V.A. Beneficiation of carbonaceous rocks: New methods and materials // (2019) Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects - 11th conference of the Russian-German Raw Materials, 2018, pp. 391-398.

14. Гурман М. А., Щербак Л. И. Флотационное обогащение бедной золото-и углеродсодержащей руды //Горный журнал. – 2017. – №. 2. – С. 70-74.

{social}