© П.И. Пилов, 2007

УДК 622.7

П.И. Пилов

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ОСНОВЕ КИНЕТИКИ СЕПАРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Семинар № 24

Эффективность сепарации при обогащении полезных ископаемых играет ключевую роль в получении продуктов заданного качества при максимально возможной для данных условий степени извлечения ценного компонента. Для ее оценки и оптимизации технологий используются многочисленные критерии [1], наиболее распространенным и объективно отражающим суть сепарационных процессов является критерий Ханкока-Луйкена, представляющий собой разность степеней извлечения в целевой продукт целевого и нецелевого компонента. В частности, если в качестве целевого продукта рассматривается концентрат, то это будет разность степеней извлечения к концентрат полезного и неполезного компонентов:

$$\eta = \varepsilon_п - \varepsilon_н .$$

Следует отметить, что здесь и дальнейших рассуждениях, исходя из сущности процесса механического обогащения, используется понятие «полезный компонент», представляющий собой минерал либо горную породу, содержащие полезные металлы и другие химические элементы и соединения.

Представленная формула после подстановки значений $\varepsilon_п = \gamma \dfrac{\beta}{\alpha}$ и $\varepsilon_н = \gamma \dfrac{1-\beta}{1-\alpha}$, где γ - выход концентрата; α, β - содержание полезного компонента в исходном продукте и в концентрате, может быть приведена к виду, хорошо известному в литературе по обогащению полезных ископаемых [1,3]:

$$\eta = \frac{\varepsilon - \gamma}{1-\alpha} .$$

Если обогащаемый материал представит в виде бинарной смеси, содержащей $\alpha_п$ полезных компонентов и $\alpha_н = 1 - \alpha_п$ неполезных компонентов, а сепарационную характеристику обогатительного процесса, т.е. зависимость вероятности извлечения в концентрат полезного компонента, в виде извлечений в концентрат полезного $E_п$ и неполезного $E_н$ компонентов, то выход концентрата составит:

$$\gamma = \alpha_п E_п + \alpha_н E_н .$$

Содержание в нем полезного компонента равно:

$$\beta = \frac{\alpha_п E_п}{\gamma} ,$$

а его извлечение в концентрат:

$$\varepsilon_п = \gamma \frac{\beta}{\alpha_п} = \gamma \frac{\alpha_п E_п}{\gamma \alpha_п} = E_п .$$

Рассуждая аналогичным образом, приходим к тому, что $\varepsilon_н = E_н$, а эффективность сепарации:

$$\eta = E_п - E_н .$$

Отсюда следует вывод о том, что она определяется лишь сепарационной характеристикой обогатительного процесса.

Закономерность извлечения в продукты обогащения полезного и неполезного компонентов определяется кинетикой сепарации, которая является специфической характеристикой любого обогатительного процесса. Не затрагивая сути кинетических явлений сепарационных процессов, примем во внимание, что извлечения в концентрат полезного и неполезного компонентов являются функциями времени сепарации, т.е.

$$\eta = E_п(t) - E_н(t).$$

Для получения уравнения кинетики сепарации часто используются общие принципы закона действия масс [2]. Наиболее распространенным считается кинетика первого порядка, когда приращение извлечения компонентов пропорционально массе неизвлеченного полезного компонента в первой степени и времени. Решение уравнения, составленного исходя из такого соотношения, дает наиболее простое выражение для степени извлечения как функцию времени:

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

где k - константа скорости сепарации; t - время процесса.

Константа скорости сепарации зависит от параметров процесса и разделительного признака x, определяемого сочетанием физических свойств сепарируемых частиц, вызывающем специфику их взаимодействия со средой, в которой осуществляется сепарация.

Рис. 1 показывает кинетику извлечения частиц в зависимости от величины константы скорости сепарации.

Частицы с различным разделительным признаком извлекаются с различной скоростью (кривые 1…5), при этом, с уменьшением величины разделительного признака скорость сепарации снижается. При определенном значении времени сепарации зависимость извлечения от разделительного признака, входящего в константу скорости сепарации, представляет собой сепарационную характеристику (рис. 2).

С увеличением времени сепарации растет извлечение всех частиц, что может привести к снижению селективности разделения и, естественно, к снижению эффективности обогащения. Но в определенной фазе процесса сепарации эффективность обогащения может принимать максимальное значение.

Для доказательства этого утверждения используем бинарную модель, речь о которой шла выше. Эффективность обогащения при использовании экспоненциального кинетического уравнения составит:

$$\eta = E_п - E_н = \left(1 - e^{-k_1 t}\right) - \left(1 - e^{-k_2 t}\right) = e^{-k_2 t} - e^{-k_1 t}.$$

Эта функция имеет максимум

$$\eta_{\max} = \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{-\frac{k_2}{k_1 - k_2}} - \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{-\frac{k_1}{k_1 - k_2}}$$

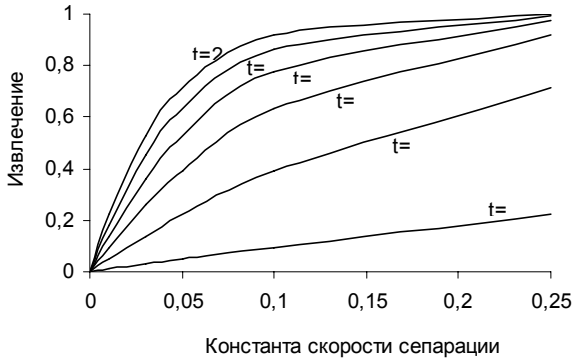
при времени сепарации

$$t_{\max} = \frac{1}{k_1 - k_2} \ln\left(\frac{k_1}{k_2}\right).$$

Для демонстрации экстремальной зависимости эффективности обогащения от времени сепарации рассмотрим пример, для которого принято $k_1 = 0,25$, $k_2 = 0,05$, $\alpha_п = 0,6$, $\alpha_н = 0,4$. Результаты расчета показателей обогащения представлены на рис. 3.

Рис. 3 подтверждает экстремальную зависимость эффективности обогащения от времени сепарации. Максимальному значению эффективности соответствуют конкретные значения

выхода концентрата и содержания в нем полезного компонента. Эти показатели и



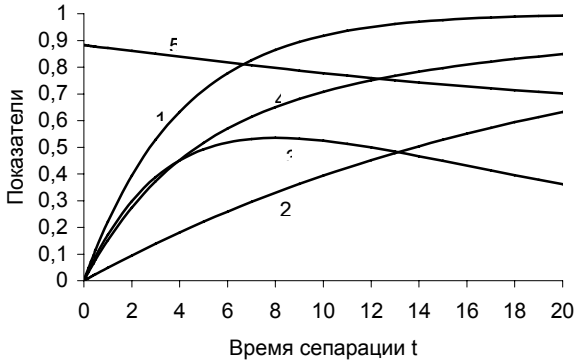


Рис. 1. Кинетика извлечения частиц в зависимости от константы скорости сепарации

Рис.2. Сепарационные характеристики при различном времени сепарации

Рис. 3. Зависимость показателей сепарации от времени флотации: *1* - извлечение полезного компонента в концентрат $E_п(t)$; *2* - извлечение неполезного компонента в концентрат $E_н(t)$; *3* - эффективность сепарации $\eta(t)$; *4* – выход концентрата $\gamma(t)$; *5* – содержание полезного компонента в концентрате $\beta(t)$

режим, обеспечивающий их достижения, следует считать оптимальными, если не существует других ограничений показателей обогащения, например, получение концентра-та заданного качества.

Экспериментальная проверка изложенного подхода осуществлялась при исследованиях флотационного процесса угольных шламов стандартным методом дробной флотации с использованием лабораторной флотационной машины 240 ФЛ-А.

Шламы каменного угля шахты им. Сташкова производственного объединения «Павлоградуголь» имели крупность менее 0,315 мм. Флотация осуществлялась при массовой концентрации твердого в пульпе 150 г/л. В качестве собирателя использовался керосин с расходом 600 г/т в начале процесса и с последующей добавкой 200 г/т. В качестве собирателя применялся реагент Т-66. Результаты флотации и расчетные показатели на их основе приведены в таблице и на рис. 4.

Полученные данные также подтверждают наличие экстремальной зависи-

Результаты дробной флотации угольного шлама класса -0,315+0 мм шахты им. Сташкова

t, мин	Показатели, %		Суммарно, %		Извлечение частиц		η
	выход	золь-ность	выход	золь-ность	угольных	породных	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1	26,86	12,29	26,86	12,29	0,5712	0,0000	0,5712
2	9,33	13,59	36,19	12,63	0,7662	0,0031	0,7631
4	4,94	16,54	41,13	13,10	0,8653	0,0083	0,8570
6	2,47	17,78	43,6	13,36	0,9140	0,0117	0,9023
12	1,78	29,25	45,38	13,98	0,9433	0,0193	0,9240
15	1,32	35,88	46,7	14,60	0,9625	0,0272	0,9354
20	0,88	44,73	47,58	15,16	0,9732	0,0343	0,9388
25	0,51	59,22	48,09	15,63	0,9772	0,0404	0,9369
40	0,92	77,21	49,01	16,78	0,9799	0,0554	0,9245
60	50,99	87,34	100	52,05	1,0000	1,0000	0,0000
	100	52,02					

мости эффективности обогащения от времени сепарации. В рассматриваемом случае максимум эффективности имеет место при времени флотации 20 мин и зольность получаемого концентрата при этом равна 15,16 %.

Рассмотренная упрощенная модель процесса сепарации предполагает наличие в обогащаемом материале наличие всего двух компонентов: полезного и неполезного, что и привело к выводу о том, что состав сепарируемого материала не влияет на эффективность обогащения.

На самом деле, в обогащаемом материале полезный и неполезный компоненты представлены частицами с различным уровнем разделительного признака, что обусловлено их физическими свойствами и условиями сепарации, и которые имеют различную вероятность извлечения в концентрат.

Состав обогащаемого материала может быть охарактеризован функцией $\varphi(x)$, которая отражает распределение компонентов по свойствам, сочетание которых составляет разделительный признак при сепарации x. Эта функция представляет собой сумму функций распределения каждого из компонентов, со-

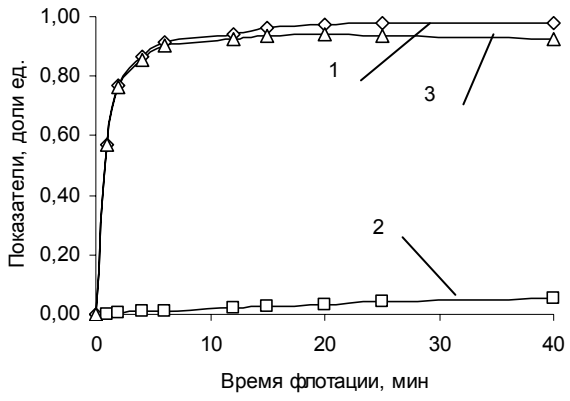


Рис. 4. Показатели дробной флотации угольных шламов: *1, 2* - степень извлечения угольных и породных частиц; *3* – эффективность обогащения

ставляющих материал, т.е.:

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i(x).$$

Если выделить часть материала с изменением свойств в пределах $x_1 \ldots x_2$, то массовая доля этой части, т.е. выход, составит:

$$\gamma_{x_1 \ldots x_2} = \int_{x_1}^{x_2} \varphi(x)\,dx = \int_{x_1}^{x_2} \sum_{i=1}^{n} \varphi_i(x) dx,$$

а содержание в ней *i*-того компонента:

$$b_i = \frac{1}{\gamma_{x_{1\ldots 2}}} \int_{x_1}^{x_2} \varphi(x) dx.$$

При этом

$$\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi(x)\,dx = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \sum_{i=1}^{n} \varphi_i(x) dx = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1,$$

где α_i - содержание в исходном продукте *i*-того компонента; $x_{\min}, x_{\max}$ - минимальное и максимальное значение разделительного признака частиц в исходном материале.

Если сепарационная характеристика обогатительного процесса задана функцией $E(x,t)$, то выход концентрата при времени сепарации t составит:

$$\gamma = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi(x) E(x,t)\,dx,$$

а содержание *i*-того компонента (например, полезного минерала) в концентрате:

$$\beta = \frac{1}{\gamma} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi_i(x) E(x,t)\,dx.$$

Степень извлечения этого компонента в концентрат составит:

$$\varepsilon_п = \gamma \frac{\beta_i}{\alpha_i} = \frac{1}{\alpha_i} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi_i(x) E(x,t)\,dx.$$

Если *i*-тый компонент является полезным, а остальные неполезными, то извлечение неполезных компонентов в концентрат составит:

$$\varepsilon_н = \gamma \frac{1-\beta_i}{1-\alpha_i} =$$

$$= \frac{1}{1-\alpha_i} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \left(\varphi(x) - \varphi_i(x)\right) E(x,t)\,dx.$$

Таким образом, эффективность обогащения после подстановки значений $\varepsilon_п$ и $\varepsilon_н$ преобразований будет равна:

$$\eta = \frac{1}{1-\alpha_i} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{\alpha_i} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi_i(x) E(x,t)\,dx - \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi(x) E(x,t)\,dx \right]$$

Анализ полученной формулы показал ее корректность, поскольку первое слагаемое представляет собой извлечение полезного компонента в концентрат, а второе – выход концентрата. С учетом этого формула легко приводится к виду, хорошо известному в обогащении полезных ископаемых [3].

Поскольку в подынтегральные выражения входят функции распределения компонентов в исходном материале, то эффективность обогащения однозначно не может быть определена только сепарационной характеристикой обогатительного процесса. Поэтому при оптимизации обогатительного процесса исследования необходимо проводить при постоянном составе обогащаемого материала.

Вместе с тем, зависимость сепарационной характеристики от времени и неодинаковая интенсивность извлечения в концентрат полезных и неполезных компонентов обусловливают экстремальную зависимость эффективности сепарации от времени процесса. Однако время процесса, при котором будет достигаться максимум эффективности будет определяться также и распределением компонентов в обога-

щаемом материале по разделительному признаку.

Предложенный метод оптимизации показателей обогащения полезных ископаемых, основанный на изучении кинетики сепарации, позволяет более объективно и с меньшими затратами оценить возможности обогатительных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барский Л.А., Плаксин И.Н.* Критерии оптимизации разделительных процессов. – М.: Наука, 1967 – 215 с.
2. *Рубинштейн Ю.Б., Филиппов Ю.А.* Кинетика флотации. – М.: Недра, 1980, 375 с.
3. *Справочник* по обогащению руд. Основные процессы/ Под ред. О.С.Богданова.- 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1984. - 381 с.

Коротко об авторах

Пилов Петр Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых, первый проректор Национального горного университета, г. Днепропетровск.

Д И С С Е Р Т А Ц И И

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ			
МОВСИСЯН Арцрун Рубенович	Исследование путей совершенствования систем подземной разработки месторождений благородных металлов	24.00.10	к.т.н.
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. КАНЫША САТПАЕВА			
ДАУРЕНБЕКОВ Сарин Джугибаевич	Разработка гидродинамического импульсатора для декольматации прискважинного пространства	05.05.06	к.т.н.