

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alexandrova'.

Руководитель ОПОП ВО
Профессор Т.Н. Александрова

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФЛОТАЦИОННОГО
ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Уровень высшего образования:	Подготовка кадров высшей квалификации
Направление подготовки:	21.06.01 Геология, разведка и разработка полезных ископаемых
Направленность (профиль):	Обогащение полезных ископаемых
Форма обучения:	очная
Нормативный срок обучения:	4 года
Составитель:	д.т.н., профессор Т.Н. Александрова

Санкт-Петербург

1. Кинетика измельчения. Кинетика флотации минерального сырья

На обогатительных фабриках измельчение является подготовительной операцией перед обогащением и имеет своим назначением раскрытие зерен минералов, содержащихся в полезном ископаемом, тесно переплетенных и сросшихся между собой. Чем полнее раскрываются минералы при измельчении, тем успешнее протекает последующее обогащение.

Крупность зерен, до которой надо измельчать исходный материал перед обогащением, определяется размером вкрапленности полезных минералов и процессом, принятым для обогащения данного ископаемого. Необходимая крупность устанавливается опытным путем при исследованиях обогатимости полезного ископаемого. Одной из важных характеристик исследуемых руд является измельчаемость.

Под измельчаемостью понимается сопротивление материала разрушению, которое зависит от прочности, крепости породы, текстурных и структурных характеристик, свойств кристаллической решетки и других физических свойств материала.

Количественное выражение измельчаемости материалов (имеет важное практическое значение, так как оно необходимо для расчета размеров и числа мельниц при проектировании новых аппаратов, для установления норм производительности мельниц, находящихся в эксплуатации, оптимизации их технологических режимов и т.д.

Так же для управления процессом измельчения руды в мельницах и подбора наиболее оптимальных параметров её работы необходимо знать как проходит данный процесс во времени, т.е. знать его кинетику.

Основные понятия

Степень заполнения мельницы измельчающими телами - отношение объема, занятого измельчающей средой (по насыпной плотности), к рабочему объему мельницы.

Критическая частота вращения - частота вращения барабана мельницы, при котором измельчающая среда, находящаяся на внутренней поверхности мельницы, начинает центрифугировать, т.е. вращаться вместе с барабаном.

Кинетика измельчения - закономерности протекания процесса измельчения во времени.

Крупность измельченного материала контролируется при помощи *контрольного сита*, размер отверстий которого соответствует предельной крупности измельчения.

Зерна, прошедшие через отверстия сита, образуют *готовый продукт*.

Скорость флотации - важная технологическая характеристика процесса. Она характеризует производительность флотационных аппаратов, позволяет судить об изменениях условий флотации и анализировать их влияние на процесс. Анализ закономерностей изменения скорости флотации во времени является весьма перспективным направлением исследования и оптимизации флотации. По результатам анализа можно, например, обосновать оптимальное распределение съема пены по фронту флотации, сопоставить и оценить флотуемость разных минералов в разных условиях, выявить действие тех или иных факторов флотации.

В последнем случае можно воспользоваться анализом изменения удельной скорости флотации во времени. Расчет значений удельной скорости флотации проводят по уравнению К.Ф. Белоглазова, для вывода которого используют общее уравнение процесса минерализации пузырьков при флотации:

$$dx/dt=Z\varphi_{\text{закр}}N(x_0-x), \quad (1)$$

где x - число частиц, закрепившихся на поверхности пузырьков к моменту времени t ; Z - коэффициент пропорциональности; $\varphi_{\text{закр}}$ - коэффициент эффективности закрепления; N - число пузырьков в единице объема пульпы, способных минерализоваться; x_0 - число частиц, подлежащих флотации в исходной пульпе.

Скорость dx/dt закрепления частиц на пузырьках пропорциональна числу частиц, способных прилипнуть к пузырькам (x_0-x) , числу пузырьков N и эффективности закрепления частиц на пузырьках $\varphi_{\text{закр}}$.

Переносим величину (x_0-x) влево, а dt - вправо и проинтегрировав, получим:

$$\int_0^x dx/(x_0-x) = \ln[x_0/(x_0-x)] = Z \int_0^t \varphi_{\text{закр}} dt.$$

Деля числитель и знаменатель первого интеграла на x_0 и заменяя x/x_0 через ε (доли ед.), получим:

$$\ln[1/(1-\varepsilon)] = Z \int_0^t \varphi_{\text{закр}} dt. \quad (2)$$

Величина $\ln[1/(1-\varepsilon)]$ характеризует изменение N или $\varphi_{\text{закр}}$ под действием различных факторов и носит название *коэффициента удельной скорости флотации*. Определение кинетики флотации имеет большое теоретическое и прикладное значение, поскольку характеризует развитие процесса флотации во времени в зависимости от различных параметров. Кинетическая модель процесса флотации необходима для разработки научных принципов расчета и конструирования новых флотационных аппаратов, обоснованного проектирования флотационных циклов и схем фабрик с учетом требований к качеству конечной продукции и извлечению ценных компонентов, построения систем управления технологическим процессом флотации в режиме автоматического регулирования. К настоящему времени предложено несколько типов двух- и однофазных моделей флотации.

Двухфазная модель четырех состояний основана на том, что частицы, поступившие в некоторый момент времени во флотационную машину, могут находиться (рис. 1) в свободном состоянии в пульпе (состояние 1) или пене (состояние 4), закрепиться на пузырьках в пульпе (состояние 2) или пене (состояние 3), перейти в концентрат (пенный продукт С) или хвосты Z.

Вероятности переходов между состояниями описываются алгебраической системой обыкновенных дифференциальных уравнений (для состояний 1-4):

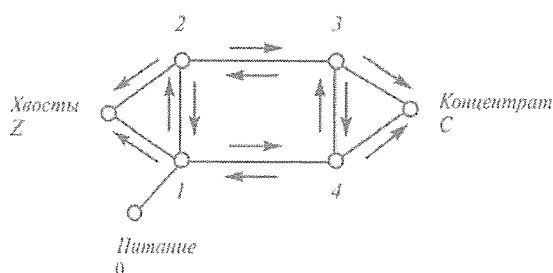


Рис. 1. Диаграмма переходов частиц из одного состояния в другое в машине непрерывного действия

$$\begin{aligned}
dM_1/dt &= -(K_{21} + K_{41} + K_{z1})M_1 + K_{12}M_2 + K_{14}M_4 + M_0; \\
dM_2/dt &= K_{21}M_1 - (K_{12} + K_{32})M_2; \quad dM_3/dt = K_{32}M_2 - (K_{43} + K_{c3})M_3 + \\
&K_{34}M_4; \quad dM_4/dt = K_{41}M_1 + K_{43}M_3 - (K_{34} + K_{14} + K_{c4})M_4, \quad (3)
\end{aligned}$$

где: $M_0 - M_4$ - массы частиц в состояниях 0, 1, 2, 3, 4 в момент времени t ; K_i - константы скоростей переходов, представляющих собой вероятности совершения переходов из одного состояния в другое в единицу времени.

При установившемся непрерывном процессе, когда

$dM_i/dt = 0$, где $i = 1 \div 4$, можно найти M_i и извлечение ϵ частиц в концентрат. Модель имеет принципиальное значение - она позволяет выделить и рассмотреть изолированно роль и значение ряда отдельных субпроцессов. Однако практическое применение модели четырех состояний затруднительно из-за большого числа параметров, которые требуется определить для описания кинетики флотации частиц, обладающих даже одинаковой вероятностью переходов (одного класса флотируемости) во флотационной машине.

Недостаток рассматриваемой модели - и отсутствие параметров, характеризующих гидродинамику и конструкцию аппарата.

В *двухфазной модели двух состояний* пульпа (фаза p) и пена (фаза f) рассматриваются как идеально перемешиваемые фазы, в каждой из которых частицы находятся только в одном состоянии. Двухфазная модель может быть получена из модели четырех состояний, если в уравнениях системы (3) состояния 1 и 2 заменить одним состоянием p , а состояния 3 и 4 - одним состоянием пены f . Тогда система уравнений, описывающих кинетику флотации в двухфазной модели, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
dM_p/dt &= -K_{fp}M_p + K_{pf}M_f - K_{zp}M_p + M_0; \\
dM_f/dt &= -K_{fp}M_p + K_{pf}M_f - K_{cf}M_f.
\end{aligned}$$

Данной модели присущи те же недостатки, что и предыдущей. Исследование и разработка двухфазных моделей позволят более достоверно учитывать роль процессов, протекающих в пенном слое.

Однофазная модель флотации - наиболее распространенная упрощенная модель, изучению которой посвящено большое число экспериментальных исследований. В этом случае учитываются частицы только в одном состоянии, т.е. в состоянии свободных частиц в пульпе. Разделив обе части уравнения (1) на x_0 и учитывая, что $x/x_0 = \varepsilon$, получаем:

$$d\varepsilon/dt = Z\varphi_{\text{закр}}N(1-\varepsilon). \quad (4)$$

Если свойства флотируемого минерала и условия флотации постоянны ($\varphi_{\text{закр}} = \text{const}$, $N = \text{const}$), то

$$d\varepsilon/dt = K(1-\varepsilon), \quad (5)$$

т.е. скорость флотации должна быть прямо пропорциональна массе флотируемого материала $(1 - \varepsilon)$ и характеризоваться вероятностью K флотации в единицу времени, отражающей все основные этапы флотационного процесса: столкновение частиц с пузырьком W_c , закрепление на пузырьке $W_{\text{закр}}$, сохранение частиц на пузырьке до выхода в пенный слой $W_{\text{сохр}}$ и удержание их в пене до съема в концентрат W_f .

Интегрируя уравнение (5), получим уравнение (6), известное как уравнение Белоглазова:

$$\varepsilon = 1 - e^{-kt}, \quad (6)$$

где e - основание натуральных логарифмов.

Если часть полезного компонента тесно связана с пустой породой (например, в виде изоморфной примеси, тонкодисперсных включений) или находится в неизвлекаемых минералах, то предельное извлечение будет менее 100 % ($\varepsilon_n < 1$). В этом случае уравнение (5) примет вид

$$d\varepsilon/dt = k(\varepsilon_n - \varepsilon),$$

после интегрирования которого получим:

$$\varepsilon = \varepsilon_n(1 - e^{-kt}). \quad (7)$$

В реальных условиях флотируемость отдельных зерен полезного минерала непостоянна, так как она зависит от многих условий: крупности и формы зерен, состояния их поверхности, наличия тонкодисперсных вкраплений пустой породы или других минералов. Кроме того, часть

полезного минерала всегда находится в сростках, состав которых может быть различным. В первую очередь в пену извлекаются наиболее легко флотируемые зерна, поэтому флотируемость остающихся в пульпе частиц непрерывно понижается. Флотируемость зерен изменяется также по ходу процесса вследствие изменения концентрации реагентов в пульпе. Только по этим причинам простейшие уравнения (6) и (7) для реальных условий обычно неприменимы. Кроме того, линейность данных уравнений скорости флотации может быть нарушена флокуляцией частиц в объеме пульпы и процессами, протекающими в зоне пены.

Накопленный экспериментальный материал показывает, что скорость флотации гораздо чаще описывается уравнением

$$d\varepsilon/dt = K(1-\varepsilon)^n = (1-\varepsilon)K'(1-\varepsilon)^{n-1} \quad (8)$$

в котором показатель степени n и изменяется от 1 до 6.

Сопоставление уравнения (8) с уравнениями (4) и (5) позволяет считать, что в реальных условиях $\varphi_{\text{закр}}$ и k являются функцией количества и флотируемости оставшихся в пульпе зерен:

$$k \approx \varphi_{\text{закр}} \approx k'(1-\varepsilon)^{n-1} \quad (9)$$

обычно $(n - 1) \geq 1$, то очевидно, что значение k (и $\varphi_{\text{закр}}$) с уменьшением доли в пульпе флотируемых зерен также уменьшается.

Заменяя в уравнении (8) член k' на $f(k)$ - функцию распределения частиц по флотируемости - и интегрируя его, получим:

$$\varepsilon = \int_0^{\infty} (1 - e^{-kt}) f(k) dk. \quad (10)$$

Формально в ряде случаев функцию распределения частиц по флотируемости $f(k)$ можно описать гамма-функцией. Фактически в условиях однофазной модели она зависит в основном от значения вероятности $f(k_i)$, флотации зерен разной крупности.

К настоящему времени показано, что общая кривая кинетики флотации в оптимальном реагентном режиме обычно является суммой кинетических

прямых флотации отдельных классов. Значения $f(k_i)$, могут быть определены по полученным экспериментальным данным (углу наклона прямых).

Очевидно, что крупность флотационных классов должна выбираться с учетом гидродинамических параметров, оптимальный реагентный режим - обеспечиваться регулированием расхода реагентов в соответствии с физико-химической моделью процесса, извлечение - рассчитываться на основании уравнения (7) для m классов крупности по уравнению

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^m \varepsilon_{ni}(1 - e^{-k_i t}). \quad (11)$$

Например, для трех классов крупности, доля извлекаемого компонента в которых соответственно α , β , γ , величина:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \varepsilon_{n1}(1 - \beta - \gamma)(1 - e^{-k_1 t}) + \varepsilon_{n2}(1 - \alpha - \gamma)(1 - e^{-k_2 t}) + \\ & + \varepsilon_{n3}(1 - \alpha - \beta)(1 - e^{-k_3 t}). \end{aligned}$$

Использование таких моделей позволяет на основе экспериментально полученных значений $f(k_i)$ для выбранных классов крупности обосновывать оптимальное распределение и число операций в цикле флотации с учетом заданных технологических показателей процесса. Трудность использования более сложных однофазных моделей обусловлена сложностью расчета принятых функций распределения параметров процесса.

Для расчета зависимости процесса от конструкции и характеристики аппарата наиболее подходят модели, включающие в себя массоперенос и обратимость флотационного прилипания.

Уравнение массопереноса для одномерного случая записывается в виде:

$$\partial C / \partial t = -v \partial C / \partial x + D_x \partial^2 C / \partial x^2, \quad (12)$$

где C - концентрация частиц; v - скорость движения потока; x - пространственная координата; D_x - коэффициент диффузии.

Первый член правой части уравнения описывает перенос частиц жидкостью, второй - диффузионный поток, вызванный градиентом концентрации частиц. В случае флотации уравнение (12), описывающее

изменение концентрации минеральных частиц, должно быть дополнено членом, характеризующим данный процесс.

Например, для колонного флотационного аппарата можно считать основным для свободных частиц движение сверху вниз, а для закрепленных на пузырьках - снизу вверх и ограничиться учетом осевого перемешивания. Система запишется в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_p}{\partial t} = -K_1 C_p + K_2 C_b, -v_p \frac{dC_p}{dx} + D_p \frac{\partial^2 C_p}{\partial x^2}; \frac{\partial C_b}{\partial t} = K_1 C_p - K_2 C_b + v_b \frac{dC_b}{dx} + D_b \frac{\partial^2 C_b}{\partial x^2}, \end{aligned}$$

где: C_b, C_p - концентрация частиц соответственно на пузырьках и в пульпе; K_1, K_2 - константы скоростей переходов из пульпы на пузырек и обратно; v_p, v_b - скорость соответственно частиц и пузырьков; D_p, D_b - коэффициенты диффузии частиц и пузырьков в пульпе.

Степень описания флотации предложенными к настоящему времени моделями недостаточна: они не позволяют с необходимой точностью предсказывать результаты флотации. Параметры моделей пока можно определить только экспериментально. Степень совершенства моделей будет возрастать с повышением достоверности аналитического описания гидродинамики флотационных аппаратов, физико-химических условий флотации, скорости процесса минерализации пузырьков и их движения, процессов в пенном слое, материального баланса твердого в камере флотационной машины с учетом скорости минерализации пузырьков, переноса и перемешивания в камере.

Зависимость $\varepsilon=f(t)$ характеризует кинетику флотационного процесса. Производная $d\varepsilon/dt$ равна скорости флотации в данный момент времени и определяется тангенсом угла наклона кривой $\varepsilon = f(t)$. Лабораторные исследования и результаты работы флотационных фабрик показывают, что при предельном извлечении близком единице, для процесса флотации применимо уравнение:

$$d\varepsilon/dt = k(1 - \varepsilon)^p$$

где: k и p - постоянные параметры, зависящие от свойств флотируемого материала и условий флотации.

Физический смысл параметра k - скорость флотации в начальный момент. Опыты флотации в идеальных условиях (узкие классы крупности из мономинеральной пульпы при постоянной концентрации коллектора в пульпе, постоянные крупность и количество подаваемых пузырьков воздуха) показали, что в этих условиях $p = 1$ и формула принимает простой вид:

$$d\varepsilon/dt = k(1 - \varepsilon)$$

После интегрирования и преобразований:

$$\ln[1/(1 - \varepsilon)] = kt$$

Графическая зависимость $\ln[1/(1 - \varepsilon)] = f(t)$ может быть прямой или кривой. Прямолинейная зависимость свидетельствует о том, что скорость флотации в течение всего времени остается постоянной. Коэффициент k равен тангенсу угла наклона линии к оси абсцисс (t).

Задание: Определить оптимальное время измельчения и рассчитать данные по кинетике флотации, построить график скорости флотации, определить константу скорости и сделать вывод о влиянии расхода собирателя на кинетику флотации.

Таблица 1

Кинетика измельчения руд

Продолжительность измельчения, мин	суммарные остатки на ситах				
	0,295 мм	0,208 мм	0,147 мм	0,104 мм	0,074 мм
Вариант 1					
0	27,6	18,1	7,8	2,5	1,1
1	39,9	36,1	18,2	9,7	7,6
5	67,2	56,3	43,1	10,2	8,3
10	69,6	58,4	55,8	49,1	40,4
20	77,5	72,3	68,7	67,2	60,1
30	100,0	96,5	93,8	90,2	87,1
Вариант 2					
0	34,7	25,0	18,5	11	6,4
1	43,7	36,3	31,1	23,8	11,1
5	86,6	77,5	68,0	54,1	48,7
10	86,4	82,2	80,3	77,2	70,7
20	100,0	99,4	95,6	91,1	87,4
30	100,0	99,9	97,8	96,3	93,2
Вариант 3					
0	31,1	21,5	13,1	6,7	3,7

1	41,8	36,2	24,6	16,7	9,3
5	76,9	66,9	55,5	32,1	28,5
10	78,0	70,3	68,0	63,1	55,5
20	88,7	85,8	82,1	79,2	73,7
30	100,0	98,2	95,8	93,2	90,1

Таблица 2

Результаты опытов по изучению кинетики флотации

Расход собирателя, г/т	Время флотации, мин.	Пр-т	Масса пр-та, г	И-ие галенита в продукт, ε, %	Суммарное из-ие, %	$\ln \frac{1}{1-\varepsilon}$
50,0	1,0	К-т 1	2,3	23,5		
	1,0	К-т 2	4,1	34,5		
	2,0	К-т 3	3,2	21,8		
	3,0	К-т 4	1,5	12,1		
		Хвосты	38,9	8,1		
100,0	1,0	К-т 1	1,8	17,6		
	1,0	К-т 2	3,5	31,4		
	2,0	К-т 3	3,7	30,5		
	3,0	К-т 4	2,2	15,6		
		Хвосты	38,8	4,9		
200,0	1,0	К-т 1	3,4	18,3		
	1,0	К-т 2	5,8	29,8		
	2,0	К-т 3	4,2	30,1		
	3,0	К-т 4	2,5	19,2		
		Хвосты	34,1	2,6		

2. Исследование влияния различных физико-химических воздействий на процесс флотации минерального сырья

Приведем схему дисперсионного анализа на следующем примере: выбрать с помощью схемы дисперсионного анализа наилучшую конструкцию импеллера флотационной машины, тип собирателя и тип вспенивателя для флотации золотоносной руды. Оценку вести по извлечению золота в концентрат и содержанию его в концентрате.

Используем латинский квадрат (табл.3).

Таблица 3

Схема латинского квадрата

		I	II	III	$j \rightarrow k$
i ↓ n	1	A	B	C	Y_1
	2	C	A	B	Y_2
	3	B	C	A	Y_3
		Y_I	Y_{II}	Y_{III}	Y
		Y_A	Y_B	Y_C	$l \rightarrow p$

в котором I-III - конструкции импеллеров; 1-3 - типы собирателей; A-C - типы вспенивателей.

Поставив девять опытов (по числу клеток в табл.5.1), получаем результаты по извлечению ε и содержанию β :

$\varepsilon, \%$			$\beta, \text{г/т}$		
87	83	84	108	112	110
90	85	93	105	110	100
92	80	88	102	115	105

Переходим к упрощенной форме записи результатов, вычитая из извлечения число 80, а из содержания число 100. Получим более удобные для расчетов результаты:

$\varepsilon, \%$			$\beta, \text{г/т}$		
7	3	4	8	12	10
10	5	13	5	10	0
12	0	8	2	15	5

Подсчитываем суммы $Y_I - Y_{III}$; $Y_1 - Y_3$; $Y_A - Y_C$ для отдельных условий и общую Y . Для извлечений этот расчет дает

$$\varepsilon_{I-III} = \sum_j^k \varepsilon_j ; \varepsilon_I = 7+10+12=29 ; \varepsilon_{II} = 8 ; \varepsilon_{III} = 25 ;$$

$$\varepsilon_{1-3} = \sum_i^n \varepsilon_i ; \varepsilon_1 = 7+3+4=14 ; \varepsilon_2 = 28 ; \varepsilon_3 = 20 ;$$

$$\varepsilon_{A-C} = \sum_l^p \varepsilon_{ij} ; \varepsilon_A = 7+5+8=20 ; \varepsilon_B = 28 ; \varepsilon_C = 14 ;$$

$$\varepsilon = \sum_{ij}^N \varepsilon_{ij} ; \varepsilon = 7+3+4+10+5+13+12+0+8 = 62 .$$

Рассчитаем суммы квадратов:

$$\Sigma_{I-III} = \sum_j^k (\varepsilon_j^2 / n) - \varepsilon^2 / N = (29^2 + 8^2 + 25^2) / 3 - 62^2 / 9 = 82,9 ;$$

$$\Sigma_{1-3} = \sum_i^n (\varepsilon_i^2 / k) - \varepsilon^2 / N = (14^2 + 28^2 + 20^2) / 3 - 62^2 / 9 = 32,9 ;$$

$$\Sigma_{A-C} = \sum_l^p (\varepsilon_{ij}^2 / n) - \varepsilon^2 / N = (20^2 + 28^2 + 14^2) / 3 - 62^2 / 9 = 32,9 ;$$

$$\Sigma_{\text{общ}} = \sum_{ij}^N (\varepsilon_{ij}^2 / n) - \varepsilon^2 / N = 7^2 + 3^2 + 4^2 + 10^2 + 5^2 + 13^2 + 12^2 + 0 + 8^2 - 62,9 / 9 = 148,9 .$$

Сумма квадратов погрешности воспроизводимости:

$$\Sigma_B = \Sigma_{\text{общ}} - \Sigma_{I-III} - \Sigma_{1-3} - \Sigma_{A-C} = 148,9 - 82,9 - 32,9 - 32,9 = 0,2 .$$

Находим число степеней свободы для групп факторов:

$$f_{I-III} = k - 1 = 3 - 1 = 2; f_{1-3} = n - 1 = 3 - 1 = 2; f_{A-C} = p - 1 = 3 - 1 = 2;$$

$$f_{\text{о6 щ}} = N - 1 = 9 - 1 = 8; f_B = f_{\text{о6 щ}} - f_{I-III} - f_{1-3} - f_{A-C} = 8 - 2 - 2 - 2 = 2.$$

Находим дисперсии влияния групп факторов и воспроизводимости:

$$S_{I-III}^2 = \Sigma_{I-III} / f_{I-III} = 82,9 / 2 = 41,45; S_{1-3}^2 = 32,9 / 2 = 16,45;$$

$$S_{A-C}^2 = 32,9 / 2 = 16,45; S_B^2 = 0,2 / 2 = 0,1.$$

Оцениваем значимость влияния групп факторов по критерию Фишера:

$$F_{\text{расч I-III}} = S_{I-III}^2 / S_B^2 = 41,45 / 0,1 = 414,5; F_{\text{расч 1-3}} = 16,45 / 0,1 = 164,5$$

$$F_{\text{расч A-C}} = 164,5; F_{\text{табл}} = 19,2 \text{ (при } P = 95 \% \text{ и } f = 2).$$

Поскольку $F_{\text{табл}} < F_{\text{расч}}$, влияние всех групп факторов (с вероятностью 95%) значимо.

Находим коэффициенты дисперсионной модели по формулам:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{N}; a_j = \frac{\varepsilon_j}{n} - \bar{\varepsilon}; b_i = \frac{\varepsilon_i}{k} - \bar{\varepsilon}; c_l = \frac{\varepsilon_l}{p} - \bar{\varepsilon}.$$

Модель в качественной форме выглядит так:

$$\varepsilon_{ijt} = \bar{\varepsilon} + a_j + b_i + c_l \pm tS_B;$$

Параметры модели:

$$\varepsilon = \frac{62}{9} = 6,88; a_I = \frac{29}{3} - 6,88 = 2,78; a_{II} = \frac{8}{3} - 6,88 = -4,22;$$

$$a_{III} = \frac{25}{3} - 6,88 = 2,44;$$

$$b_1 = \frac{14}{3} - 6,88 = -2,22; b_2 = \frac{28}{3} - 6,88 = 2,44; b_3 = \frac{20}{3} - 6,88 = -0,22;$$

$$c_A = \frac{20}{3} - 6,88 = -0,22; c_B = \frac{28}{3} - 6,88 = 2,44;$$

$$c_C = \frac{14}{3} - 6,88 = -2,22;$$

$$S_B = \sqrt{S_B^2} = \sqrt{0,2} = 0,31; t = 4,3 \text{ (для } P=95\%).$$

Модель

$$\varepsilon = 80 + 6,88 + a_j + b_i + c_l \pm 4,3 \cdot 0,31$$

или

$$\varepsilon = 86,88 + a_j + b_i + c_l \pm 1,3.$$

Лучшее сочетание факторов (факторы I,2,B) по извлечению

$$\varepsilon_{1,2,B} = 86,88 + 2,78 + 2,44 + 2,44 \pm 1,3 = 94,54 \pm 1,3\%$$

С целью закрепления материала рекомендуется самостоятельно:

1. Рассчитать дисперсионную модель не только для извлечения, но и содержания золота в концентрате β .

2. По полученным моделям для ε и β рассчитать результаты для всех возможных вариантов сочетаний факторов, представив данные в виде табл.4.

Таблица 4

Прогноз результатов обогащения по модели

Номер опыта	Факторы	ε , %	β , г/т
1	I 1 A	86,22 ± 1,3	
2	I 1 B	88,88 ± 1,3	
...

а также в виде графика в координатах $\varepsilon = f(\beta)$.

3. Нанести на графике поля корреляции режимов кривую обогатимости $\varepsilon_{\max} = f(\beta)$ (для этого надо соединить верхние точки корреляционного поля плавной линией).

4. Рассчитать по полученной модели условия, обеспечивающие:

- а) получение максимального извлечения золота в концентрат;
- б) получение концентрата наилучшего качества;
- в) получение концентрата заданного качества ($\beta_{\text{зад}} = 107$ г/т).

Задание.

№№ п/п	Вариант 1					
	Извлечение, %			Содержание, кг/т		
1	87	83	84	108	112	110
2	89	84	92	104	109	100
3	91	79	87	101	114	104
№№ п/п	Вариант 2					
	Извлечение, %			Содержание, кг/т		
1	86	82	83	107	111	109
2	89	84	92	104	109	101
3	91	79	87	101	114	104
№№ п/п	Вариант 3					
	Извлечение, %			Содержание, кг/т		
1	85	81	82	106	110	108
2	88	83	91	103	108	100
3	90	78	86	100	113	103
№№ п/п	Вариант 4					
	Извлечение, %			Содержание, кг/т		

1	88	84	85	110	114	112
2	91	86	94	107	112	102
3	93	81	89	104	117	107
№№ п/п	Вариант 5					
	Извлечение, %			Содержание, кг/т		
1	89	85	86	109	113	111
2	92	87	95	106	111	101
3	94	82	90	103	116	106
№№ п/п	Вариант 6					
	Извлечение, %			Содержание, кг/т		
1	84	80	81	105	109	107
2	87	82	90	102	107	97
3	89	77	85	99	112	102
№№ п/п	Вариант 7					
	Извлечение, %			Содержание, кг/т		
1	90	86	87	110	114	112
2	93	88	96	107	112	102
3	95	83	91	104	117	107
№№ п/п	Вариант 8					
	Извлечение, %			Содержание, кг/т		
1	86	82	83	107	111	109
2	89	84	92	104	109	99
3	91	79	87	101	114	104
№№ п/п	Вариант 9					
	Извлечение, %			Содержание, кг/т		
1	86	82	83	106	110	108
2	89	84	92	103	108	98
3	91	79	87	100	113	103
№№ п/п	Вариант 10					
	Извлечение, %			Содержание, кг/т		
1	88	84	85	109	113	111
2	91	86	94	106	111	101
3	93	81	89	103	116	106

3. Расчет качественно-количественных, водно-шламовых схем флотации. Расчет необходимого количества реагентов.

Флотационные реагенты используются для направленного изменения поверхностной энергии на границе раздела фаз с целью изменения показателя флотуемости разделяемых минералов, числа и размера пузырьков воздуха, прочности пены. Разработка и внедрение новых эффективных реагентов и их сочетаний определяют прогресс в области флотационного обогащения.

Выбор типа и расхода реагентов зависит от принятой технологической схемы флотации и производится на основе данных работы

действующих фабрик или результатов промышленных испытаний. При выборе типа реагента следует учитывать, что флотационные реагенты должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) иметь постоянный состав;
- 2) быть нетоксичными;
- 3) хорошо растворяться в воде;
- 4) действовать селективно;
- 5) быть эффективными;
- 6) иметь невысокую стоимость;
- 7) быть недефицитными.

Флотационные реагенты могут быть органическими или неорганическими соединениями, а также их растворами или смесями. Часть из них образует в водной фазе пульпы истинные растворы ионно-молекулярной дисперсности, часть растворяется весьма слабо, образуя коллоидно-дисперсные растворы, эмульсии и тонкие взвеси. Номенклатура реагентов насчитывает сотни наименований.

Современная классификация предусматривает разделение флотационных реагентов в зависимости от их роли при флотации на следующие группы.

- собиратели;
- пенообразователи;
- регуляторы среды;
- активаторы;
- депрессоры.

Депрессоры, активаторы и регуляторы среды часто относят к одной группе и называют модификаторами, поскольку один и тот же реагент может выполнять различную роль при флотации

Собиратели

Собиратели представляют собой органические соединения, которые, избирательно закрепившись на поверхности гидрофильных или гидрофобных

минералов, уменьшают их смачиваемость водой (способствует их прилипанию к воздушному пузырьку) или наоборот.

По способности диссоциировать на ионы собиратели подразделяются на ионогенные (распадающиеся на ионы в воде) и неионогенные (не распадающиеся на ионы).

Ионогенные собиратели – электролиты, образующие в растворе заряженные ионы, в состав которых входят функциональные группы и углеводородный радикал. Эти собиратели могут быть анионными, закрепляющимися на поверхности минералов в виде отрицательно заряженных ионов (ксантогенаты, дитиофос, фаты, карбоновые кислоты и др.), и катионными, закрепляющимися на поверхности минералов в виде положительно заряженных ионов (амины и другие органические производные аммиака) применяют в виде солей, особенно уксусной и соляной кислот (аминоацетаты и аминоклориды). Анионные собиратели получили наибольшее распространение в практике флотации.

Также выделяют амфолитные или амфотерные собиратели, которые в зависимости от условий проявляющие свойства как анионоактивных, так и катионоактивных реагентов.

В зависимости от функциональной группы различают оксигидрильные и сульфгидрильные реагенты собиратели. Оксигидрильные собиратели – ионогенные анионные собиратели, в функциональную группу которых входят атомные группы: COOH , OH , $-\text{OSO}_3$, SO_4 и др. Сульфгидрильные собиратели – ионогенные анионные собиратели, в состав солидофильной группы которых входит двухвалентная сера. Такие собиратели широко применяются при флотации сульфидных и некоторых окисленных минералов цветных металлов.

Неионогенные собиратели – неэлектролиты, это главным образом аполярные водородные жидкости (масла), образующие на поверхности флотируемых минералов гидрофобные пленки.

Пенообразователи

Представляют собой ПАВ, способные сорбироваться на поверхности «вода-воздух». Их присутствие в пульпе повышает механическую прочность воздушных пузырьков, способствует сохранению их в диспергированном состоянии, улучшая тем самым условия прилипания частиц флотируемого минерала к пузырькам воздуха и устойчивость пены.

По флотационному действию вспениватели делятся на 2 типа: селективно и неселективно действующие. Первые практически не обладают собирательными свойствами при флотационном обогащении, вторые имеют заметные собирательные свойства.

Селективно-действующие вспениватели необходимы для операций, в которых производится разделение близких по флотируемости минералов, т.к. наличие у вспенивателя даже очень слабого собирательного действия может вызвать нарушение селективности этого процесса.

Регуляторы среды

К ним относятся реагенты, изменяющие величину рН среды (известь, кальцинированная сода, серная и соляная кислота).

Важность величины рН обуславливается следующими факторами:

- каждый минерал наиболее эффективно флотируется при строго определенном значении рН.

- от величины рН зависит форма нахождения флотационных реагентов.

Ионы ОН связывают катионы тяжелых металлов и предотвращают связывание собирателей.

Активаторы

Активаторы - это флотационные реагенты, модификаторы, усиливающие взаимодействие реагентов собирателей с поверхностью флотируемых частиц. Активаторы непосредственно взаимодействуют с поверхностью извлекаемых частиц. Типичными активаторами являются медный купорос, сернистый натрий и т. д.

Депрессоры

Депрессоры (подавители) – флотационные реагенты, регуляторы, применяемые для улучшения селективности флотации. Депрессоры закрепляются на поверхности определенных минералов и препятствуют адсорбции собирателя на них, а также гидрофилизуют поверхность этих минералов и тем самым предотвращают их флотацию одновременно с другими минералами. Типичными депрессорами являются соли неорганических кислот, содержащие анионы S^- , SO_2^- , SiO_3^- , CN^- , H_2SO_3 , а также известь, углеводы, лигнин, различные органические красители, танин и др.

Различают неорганические и органические депрессоры.

Неорганические депрессоры – соли неорганических кислот, содержащие анионы, сернистый натрий, цианиды, соли цинка, соли хрома, некоторые комплексные соединения, жидкое стекло и др.

Органические депрессоры – высокомолекулярные органические вещества. Органические депрессоры в зависимости от содержащихся в них полярных групп, по Горловскому, делятся на четыре класса:

- неионогенные (крахмал, оксиэтилцеллюлоза и др.),
- анионные (карбоксиметилцеллюлоза, лигносульфонаты и др.),
- катионные (поливиниламин, хитозан, сополимеры винилпиридина и др.),
- амфотерные (гидролизированный полиакриламид, казеин и другие белки).

Расчет количества расходуемых реагентов

Расчет количества расходуемых при работе обогатительной фабрики реагентов (собирателя, вспенивателя, флокулянта и т. д.) производится с целью получения необходимых данных для определения экономических показателей.

Удельный расход реагента, подаваемого в операцию, принимается по данным практики, результатам исследований или по сведениям из литературных источников.

Примерные удельные расходы реагентов:

- собирателя (подается в операцию флотации) – 0,8 – 2,0 кг/т;
- вспенивателя (подается в операцию флотации) – 0,02 – 0,12 кг/т;
- флокулянта (подается в операцию сгущения отходов) – 0,02 – 0,06 кг/т.

Для перечистой и контрольной флотации расход реагентов обычно снижается вдвое.

Количество реагента, которое необходимо подать в данную операцию (кг/ч), определим по формуле:

$$X = Q_i \cdot q_i$$

где Q_i – количество материала, поступающего в операцию, т/ч; q_i – удельный расход реагента, подаваемого в операцию, кг/т.

Весовое или объемное количество воды, м³/ч:

$$B = X \cdot \left(\frac{100}{C} - 1 \right)$$

где C – концентрация раствора, %

Годовое потребление каждого реагента определяется по формуле:

$$P_i = \frac{k \cdot X \cdot T}{1000}, \text{ т/год,}$$

где k – коэффициент неравномерность нагрузки; T – количество машинных часов работы фабрики в году, час.

Задание.

Задача 1. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Сорского месторождения. Расход пульпы в основной флотации – 6758 м³/сут. Время флотации – 6 минут. Расход пульпы в контрольной флотации – 6673 м³/сут. Время флотации – 5 минут.

Задача 2. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Миргалимсайского месторождения. Расход пульпы в

основной флотации – 9068 м³/сут. Время флотации – 9 минут. Расход пульпы в перечистке – 3032 м³/сут. Время флотации – 6 минут.

Задача 3. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Учалинского месторождения. Расход пульпы в основной флотации – 7509 м³/сут. Время флотации – 8 минут. Расход пульпы в контрольной флотации – 5611 м³/сут. Время флотации – 6 минут.

Задача 4 Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Гайского месторождения. Расход пульпы в основной флотации – 12529 м³/сут. Время флотации – 9 минут. Расход пульпы в перечистке – 2001 м³/сут. Время флотации – 6 минут.

Задача 5. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Молодёжного месторождения. Расход пульпы в основной флотации – 11612 м³/сут. Время флотации – 8 минут. Расход пульпы в контрольной флотации – 21384 м³/сут. Время флотации – 7 минут.

Задача 5. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Кургашиканского месторождения. Расход пульпы в основной флотации – 11312 м³/сут. Время флотации – 9 минут. Расход пульпы в перечистке – 1636 м³/сут. Время флотации – 7 минут.

Задача 7. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Зыряновского месторождения. Расход пульпы в контрольной флотации – 17000 м³/сут. Время флотации – 6 минут. Расход пульпы во второй перечистке – 781 м³/сут. Время флотации – 6 минут.

Задача 8. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Норильской фабрики. Расход пульпы в основной флотации – 16544 м³/сут. Время флотации – 8 минут. Расход пульпы в 3-й перечистке – 473 м³/сут. Время флотации – 5 минут.

Задача 9. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Кафанской фабрики. Расход пульпы в контрольной флотации – 19192 м³/сут. Время флотации – 7 минут. Расход пульпы в 4-ой перечистке – 393 м³/сут. Время флотации – 6 минут.

Задача 10. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Джекказганской фабрики. Расход пульпы в основной флотации – 20700 м³/сут. Время флотации – 7 минут. Расход пульпы в первой перечистке – 2400 м³/сут. Время флотации – 6 минут.

Задача 11. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Сихоте-Алинской фабрики. Расход пульпы в контрольной флотации – 17080 м³/сут. Время флотации – 7 минут. Расход пульпы во 2-ой перечистке – 754 м³/сут. Время флотации – 5 минут.

Задача 12. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Лениногорской фабрики. Расход пульпы во 2-ой контрольной флотации – 21300 м³/сут. Время флотации – 6 минут. Расход пульпы в 3-ей перечистке – 1186 м³/сут. Время флотации – 6 минут.

Задача 13. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Сибайской фабрики. Расход пульпы в основной флотации – 22340 м³/сут. Время флотации – 6 минут. Расход пульпы в перечистке – 9554 м³/сут. Время флотации – 8 минут.

Задача 14. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Балхашской фабрики. Расход пульпы во 2-ой основной флотации – 18840 м³/сут. Время флотации – 5 минут. Расход пульпы во 2-ой перечистке – 3583 м³/сут. Время флотации – 6 минут.

Задача 15. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Сибайской фабрики. Расход пульпы в контрольной флотации – 18320 м³/сут. Время флотации – 12 минут. Расход пульпы в 3-ей перечистке – 2355 м³/сут. Время флотации – 8 минут.

Задача 16. Выбрать и рассчитать флотационные машины для обогащения руды Каджаранской фабрики. Расход пульпы во 2-ой контрольной флотации – 15670 м³/сут. Время флотации – 10 минут. Расход пульпы в 4-ой перечистке – 2620 м³/сут. Время флотации – 6 минут.

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная:

1. Абрамов, А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т.2. Технология переработки и обогащения полезных ископаемых [Электронный ресурс] : учеб. - Электрон. дан. - Москва: Горная книга, 2004. - 510 с

<https://e.lanbook.com/book/3266>.

2. Абрамов, А.А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов: Учебное пособие в 2 кн. Т.3. Книга 2. Pb, Pb-Cu, Zn, Pb-Zn, Pb-Cu-Zn, Cu-Ni, Co-, Bi-, Sb-, Hg- содержащие руды [Электронный ресурс] : учеб. пособие - Электрон. дан. - Москва : Горная книга, 2005. — 470 с.

<https://e.lanbook.com/book/3268>.

Дополнительная:

3. Справочник по обогащению руд. Т. 1. Подготовительные процессы / Редкол.: Богданов О.С. (гл. ред.), Олевский В.А. (отв. ред.) и др. - М. : Недра, 1972. - 448 с.

4. Справочник по обогащению руд. Т. 1. Подготовительные процессы / Редкол.: Богданов О.С. (гл. ред.), Олевский В.А. (отв. ред.) и др. - М. : Недра, 1972. - 448 с.

<https://e.lanbook.com/book/47431>

5. Обогащение полезных ископаемых: учеб. пособие [Электронный ресурс]: / К.И. Лукина, В. П. Якушкин, А. Н. Муклакова. — М.: ИНФРА-М, 2017. — 224 с. — (Высшее образование: Специалитет).

<http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=561064>

6. Александрова Т.Н. Обогащение полезных ископаемых. [Электронный ресурс]: учебник/ Кусков В.Б., Львов В.В., Николаева Н.В – Электрон. дан. РИЦ Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Заказ 503. С 144 (ISBN 978-5-94211-731-3), 2015, 530 с.

http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=402&task=set_static_req&bns_string=NWPIB,ELC,ZAPIS&req_irb=<.>I=33%2E4%D1%8F73%2F%D0%9E%2D21%2D667610266<.>

7. Обогащение полезных ископаемых: учеб. пособие [Электронный ресурс]: / К.И. Лукина, В. П. Якушкин, А. Н. Муклакова. — М.: ИНФРА-М, 2017. — 224 с. — (Высшее образование: Специалитет).
<http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=561064>

8. Александрова Т.Н. Обогащение полезных ископаемых. [Электронный ресурс]: Учебник/ Кусков В.Б., Львов В.В., Николаева Н.В – Электрон. дан. РИЦ Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Заказ 503. С 144 (ISBN 978-5-94211-731-3), 2015, 530 с.
http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=402&task=set_static_req&bns_string=NWPIB,ELC,ZAPIS&req_irb=<.>I=33%2E4%D1%8F73%2F%D0%9E%2D21%2D667610266<.>

СОДЕРЖАНИЕ

1. Кинетика измельчения. Кинетика флотации минерального сырья	2
2. Исследование влияния различных физико-химических воздействий на процесс флотации минерального сырья	11
3. Расчет качественно-количественных, водно-шламовых схем флотации. Расчет необходимого количества реагентов.	15
РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	23