

**А.А.БЕРЕЗНЯК**, канд. техн. наук,  
**И.К. МЛАДЕЦКИЙ**, д-р техн. наук,  
**Э.М. ПАЙВА**

(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

## **РАЗМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ В ПУЛЬПЕ**

*Введение.* При магнитной сепарации ферромагнитные частицы магнетита намагничиваются практически до насыщения. После выхода из зоны сепарации они имеют остаточную намагниченность, что способствует их флокуляции. Если нерудные частицы были захвачены в тело флокулы, то они остаются в них и в дальнейшем практически не выводятся в обедненный продукт, что влечет за собой невозможность повышения качества концентрата до теоретических значений. Таким образом, необходима промежуточная операция, которая бы предотвращала образование флокул, например, путем размагничивания частиц магнетита. В этом случае пульпа была бы представлена отдельными частицами, а не агрегатами частиц.

*Постановка задачи.* Задача размагничивания тонких частиц в пульпе до сих пор решалась путем создания размагничивающих аппаратов, в которых амплитуда напряженности переменного магнитного поля снижалась от напряженности насыщения магнетита до нуля от входа пульпы в аппарат до ее выхода. Пульпа свободным потоком проходила через этот аппарат. Частота переменного магнитного поля была 50 Гц. Флокулы уменьшали свои размеры по сравнению с размерами в постоянном магнитном поле разделения сепаратора. Это явление способствовало освобождению нерудных частиц из флокул, поэтому предполагалось, что происходит размагничивание частиц. Никакие физические способы определения остаточной напряженности частиц и флокул не проводились. Заключение об эффекте размагничивания проводилось по результатам дальнейшей немагнитной сепарации: чем больше разность качества обогащенного продукта в двух приемах сепарации с применением размагничивающего аппарата, там больше предполагался эффект размагничивания. И когда размер флокул приближен к размерам отдельных частиц возможно максимальное приближение качества концентрата к теоретически предельному значению. И уже не имеет значения способ разделения: магнитный, гравитационный или флотационный. Аппараты называли размагничивающими и в промышленности стали их использовать перед сепарацией, если пульпа уже прошла операцию разделения в магнитном поле. На наш взгляд это не было размагничиванием, а снижением размера флокул, что, естественно, влекло за собой снижение захвата нерудных частиц при сепарации. Размагничивание должно приводить к такому состоянию, когда флокулы имеют размеры отдельных частиц.

## **Магнітна і електрична сепарація**

*Математическая модель.* Размагничивание ферромагнитного образца производится следующим образом. Образец жестко закрепляется в пространстве, где будет наведено магнитное поле. Ориентация образца такая, что ось легкого намагничивания располагается параллельно вектору внешнего магнитного поля.

Устанавливается напряженность поля, соответствующая насыщению образца.

Производится многократное изменение направления вектора напряженности. В результате образец будет иметь остаточную намагниченность, которая располагается на кривой начального намагничивания.

Уменьшают амплитуду напряженности и процедура изменения поля повторяется. Так поступают до тех пор, пока напряженность магнитного поля не снизится до нуля. В результате образец будет полностью размагничен. Основным условием размагничивания является жесткое его положение в переменном магнитном поле. Когда образец не закреплен, то он под действием механических сил магнитного поля стремится изменить свое положение в соответствии с изменением направления вектора внешнего магнитного поля, поворачиваясь осью легкого намагничивания вслед за этим вектором. Скорость следования образца за скоростью изменения внешнего магнитного поля зависит от намагниченности образца, от параметров внешней среды и условий закрепления образца в пространстве. Намагниченность образца не изменяется при условии его подвижности во внешнем переменном магнитном поле.

Чтобы добиться перемагничивания частиц в пульпе, где, как известно, ферромагнитные частицы свободно могут ориентироваться вдоль вектора внешнего магнитного поля, оно должно изменяться со скоростью, которая превышает скорость механического перемещения образца в этом поле. Угол запаздывания между углом поворота частицы и вектором внешнего магнитного поля должен быть более  $90^\circ$ . В этом случае вектора остаточной намагниченности частицы и внешнего поля коллинеарные составляющие разной направленности. Определим, какова должна быть при этом частота изменения поля.

Магнитное разделение измельченных частиц полезного ископаемого получило широкое распространение в связи с простотой реализации и экологической чистотой. С технологической точки зрения результаты такого разделения остаются далекими от желаемых и это связано со склонностью тонких частиц к объединению в агрегаты. Кроме того, частицы полезного ископаемого представляют собой так называемые сростки ценного минерала с неценным и в результате объединения в агрегаты могут захватывать в тело агрегата открытые нерудные частицы. Чтобы удалить такие частицы, необходимо разрушить агрегат.

Как известно, положительный результат дают многократные перечистки обогащенного продукта. Однако эффективность таких перечисток после 2-3 - х операций заметно снижается. Эффект повышения качественных показателей разделения при перечистках связан с разрушением агрегатов, а каждая из таких перечисток реализует незначительное количество циклов разрушения агрега-

тов. Следовательно, чем больше циклов разрушения агрегатов, тем выше качественные показатели разделения.

Этот принцип реализовывался путем дополнительной магнитной обработкой потока частиц в переменном магнитном поле [1]. Причем, как и следовало ожидать: чем выше частота магнитного поля, тем больший прирост качественных показателей при дальнейшем применении немагнитного разделения.

Визуальные наблюдения за поведением магнитных частиц в переменном магнитном поле низкой частоты показало, что агрегаты и отдельные частицы ориентируются в поле, осью легкого намагничивания (длинной осью), вдоль вектора внешнего магнитного поля и при его вращении переориентируются в соответствии с поворотом этого вектора. Дальнейшее повышение частоты приводит к некоторому разрушению агрегатов. Но вращение уменьшенных агрегатов продолжает осуществляться. Вероятно, что увеличение частоты магнитного поля приведет к полному разрушению агрегатов и далее, в силу механической инерции, частицы уже не будут успевать следовать за вектором поля и начнут реализовываться условия перемагничивания частиц. А если же при этом уменьшать амплитуду вектора внешнего магнитного поля, то вероятны условия размагничивания частиц. Размагниченные частицы уже будут в значительной степени меньше взаимодействовать друг с другом и, при дальнейшем немагнитном разделении, например, по плотности частиц, вероятность захвата нерудных частиц должна существенно снизиться.

В научной литературе по обогащению полезных ископаемых воздействие переменным магнитным полем любой с частотой 50Гц и более на магнитные частицы в пульпе уже называлось размагничиванием, а результат такого воздействия оценивался по результатам приращения качественных показателей продуктов разделения. Исследований структуры распределения частиц в пульпе после такого размагничивания не обнаружено.

В работе [2] всесторонне исследован вопрос о влиянии крупности частиц утяжелителя на реологические свойства суспензии. Доказано, что, чем меньше размер частиц, тем большую кажущуюся вязкость приобретает суспензия. Таким образом, необходимо объективно определить размеры магнитных агрегатов после воздействия переменного магнитного поля высокой частоты с уменьшающейся амплитудой.

На кафедре обогащения полезных ископаемых ГВУЗ "Национальный горный университет" разработано устройство, генерирующее импульсы магнитного поля частоты свыше 20 кГц и максимальной амплитудой 50 кА/м. Амплитуда спадает до нуля за 10-15 периодов. Скважность импульсов может быть любой. Но, чем меньше скважность, тем меньше расходуется энергии на магнитную обработку. В результате воздействие поля осуществляется в течение 0,5-1 мс. Лабораторный аппарат имеет длину 0,2 м и скорость прохождения пульпы через участок магнитного воздействия составляет 1,5 м/с.

Таким образом, время прохождения пульпой участка импульсного магнитного воздействия составляет 0,13 с. Экспериментально определено, что достаточно двух циклов размагничивания, поэтому период следования размагничи-

## **Магнітна і електрична сепарація**

ваючих імпульсов равен 0,065 с, что соответствует частоте следования импульсов 25 Гц.

Рассмотрим действие переменного магнитного поля на отдельные магнитные частицы. Последние имеют обычно вытянутую форму, близкую к эллипсоиду вращения с соотношением большой оси к малой  $\Lambda = 2$ . Частица длинной осью (легкого намагничивания) ориентируется вдоль вектора внешнего магнитного поля. В случае переменного магнитного поля частица следует за изменением этого вектора. Магнитная сила, ориентирующая частицу равна

$$F_{M1} = \frac{1}{\delta l} \mu_0 H^2 (\kappa_a - \kappa_b) \sin \alpha,$$

где  $\kappa_a, \kappa_b$  – объемные магнитные восприимчивости частицы вдоль длинной и короткой осей;  $\alpha$  – угол между вектором  $H$  и осью  $a$  частицы. Величины  $\kappa_a, \kappa_b$  зависят от магнитной восприимчивости вещества  $\kappa_M$  и от соотношения  $a / b = \Lambda$ , то есть от размагничивающего фактора  $N$  вдоль каждой из осей [3]. Для шара  $N = 0,33$ , для бесконечно длинного стержня  $N = 0$ , а для тонкой круглой пластины бесконечной площади  $N \rightarrow \infty$ . Для эллипсоидов вращения конечных размеров

$$N_a = \frac{\Lambda^2}{(\Lambda^2 - 1)\sqrt{\Lambda^2 - 1}} (\ln(\Lambda + \sqrt{\Lambda^2 + 1}) - 1),$$

$$N_b = \frac{\Lambda^2}{(\Lambda^2 - 1)} \left(1 - \frac{\ln(\Lambda + \sqrt{\Lambda^2 + 1})}{\Lambda\sqrt{\Lambda^2 - 1}}\right).$$

Препятствует вращению частицы сила вязкости. Поскольку происходит вращение частицы, то  $U = 2\pi\omega\alpha$ , где  $\omega$  – частота изменения внешнего магнитного поля.

Уравнение движения частицы –  $F_{M1} = F_\mu$  [Н/кг] = [м/с<sup>2</sup>] поскольку силы удельные. Учитывая, что  $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$  имеем

$$\frac{36\pi\mu}{\delta l} \frac{d\alpha}{dt} = - \frac{\mu_0 H^2 (\kappa_a - \kappa_b)}{\delta l} \sin \alpha$$

Обозначив  $B = \mu_0 H^2 (\kappa_a - \kappa_b)$ ,  $36\pi\mu = A$ , получаем уравнение

$$\frac{d\alpha}{\sin \alpha} = \frac{B}{A} dt.$$

Решение данного уравнения имеет вид

$$\ln(\csc \alpha - \operatorname{ctg} \alpha) = -\frac{B}{A}t + \ln C.$$

Начальные условия выберем из таких соображений. Допустим, что поле изменяется мгновенно от  $-H1$  до  $+H1$ . Частица, естественно, не может сразу же успеть за полем, следовательно  $\alpha_0 = \pi/2$ . Далее поле остается на уровне  $+H1$  и при  $t \rightarrow \infty$   $\alpha \rightarrow 0$ . Итак, при  $t = 0$   $\alpha = \pi/2$ , тогда:

$$\ln(\csc \frac{\pi}{2} - \operatorname{ctg} \frac{\pi}{2}) = \ln C \quad (1)$$

то есть  $\csc \frac{\pi}{2} = 1$ ,  $\operatorname{ctg} \frac{\pi}{2} = 0$ , значит  $\ln C = 0$ ,  $C = 1$ . При этом окончательное решение уравнения (1) примет вид

$$\csc \alpha - \operatorname{ctg} \alpha = \exp(-\frac{B}{A}t).$$

Упростим последнее выражение, для чего тригонометрические функции выразим через гармонические, то есть

$$\frac{1}{\sin \alpha} - \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{\sin \alpha} = \frac{1 - \sqrt{1 - \sin \alpha}}{\sin \alpha} = \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

Тогда  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \exp(-\frac{B}{A}t).$

Откуда

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \exp(-\frac{B}{A}t).$$

Время действия на частицу поля одной полярности равно половине периода:  $t = (2\omega)^{-1}$ . На основании чего получаем функцию угла запаздывания от частоты

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \exp(-\frac{B}{2\omega A}).$$

Связь между магнитными восприимчивостями вещества  $\kappa_M$  и тела имеет вид  
**Збагачення корисних копалин, 2014. – Вип. 57(98)**

## Магнітна і електрична сепарація

$$\kappa_a = \frac{\kappa_M}{1 + N_a \kappa_M}, \quad \kappa_b = \frac{\kappa_M}{1 + N_b \kappa_M}.$$

Произведем численную проверку выведенной зависимости при таких исходных данных:  $H = 10^4$  А/м,  $\kappa_M = 10$ ,  $\Lambda = 2$ .

$$N_a = 4/\sqrt{3} \ln(2 + \sqrt{5}) - 1)/3 = 0,77, \quad N_b = 4(1 - (2\sqrt{3})^{-1} \ln(2 + \sqrt{5}))/3 = 5,3$$

$$\kappa_a = \frac{10}{1 + 0,77 \times 10} = 1,15, \quad \kappa_b = \frac{10}{1 + 5,3 \times 10} = 0,18,$$

$$\kappa_a - \kappa_b = 1,15 - 0,18 \approx 1, \quad A = 36 \times 3,14 \times 10^{-3} = 0,113,$$

$$B = 1,26 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^8 = 126,$$

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \exp\left(-\frac{557}{\omega}\right).$$

Изменение угла запаздывания от частоты переменного магнитного поля представлено зависимостью в таблице.

Зависимость угла запаздывания движения магнитной частицы от частоты внешнего переменного магнитного поля

Гц	10	50	100	500	1000	1500	2000	3000	20000
Град.	0	0,006	0,24	36	49	69	74	79	120

Таким образом, при частоте 500 Гц угол запаздывания уже значителен и частицы совершают колебательные движения, не успевая совершать вращение, а при частоте 1 кГц угол запаздывания становится больше  $45^\circ$ . Размагничивание будет наблюдаться в том случае, когда угол запаздывания будет более  $90^\circ$ . В этом случае наблюдается противоположное направление намагниченности частицы и вектора внешнего магнитного поля. Когда угол запаздывания приближается к  $180^\circ$ , тогда условия для размагничивания частиц будут идеальными. Следовательно, при частоте 20 кГц наблюдается размагничивание тонких частиц магнетита. На этом основании можно считать, что размагничивание осуществляется настолько полное, насколько это возможно в условиях воздействия магнитного поля Земли.

Результаты воздействия переменного магнитного поля на поток пульпы оценивали путем наблюдения под микроскопом пробы пульпы, размещенной на стеклянной палетке. Для этого было проведено две серии опытов.

Первая серия заключалась в том, что проба пульпы подвергалась намагничиванию в постоянном магнитном поле средней напряженности 50 кА/м. Затем

## **Магнітна і електрична сепарація**

проба достаточнo інтенсивно вібалтывалась. После чего некоторое время отстаивалась до состояния, когда твердая фаза полностью осаждалась. Из осажденной части отбиралась малая проба, размещалась на палетке, разравнивалась до состояния, когда отдельные частицы становились различимыми на просвет. На этом заканчивалась подготовка пробы.

Вторая серия опытов отличалась от первой тем, что после операции намагничивания, пробы пропускались через соленоид с импульсным переменным магнитным полем, причем длительность импульса равнялась 1 мс. Амплитуда напряженности магнитного поля в соленоиде уменьшалась от 50 кА/м до нуля с частотой 20 кГц.

Результаты фиксировались фотосъемкой. На рис. 1 показана намагниченная пульпа, а на рис. 2 – подвергшаяся размагничиванию.

Анализ результатов магнитного воздействия на поток пульпы, приведенный на рис. 1 и 2, показывает, что размеры агрегатов после размагничивания существенно меньше и механическое воздействие практически не оказывает влияния на структуру пульпы.

Размеры агрегатов частиц намагниченной пульпы не изменяют своих размеров в результате механического воздействия на поток пульпы. Следовательно, проведенное магнитное воздействие приводит к размагничиванию частиц пульпы и существенно снижает размер агрегатов частиц. Что подтверждается теоретическими выкладками, приведенными в данной работе.

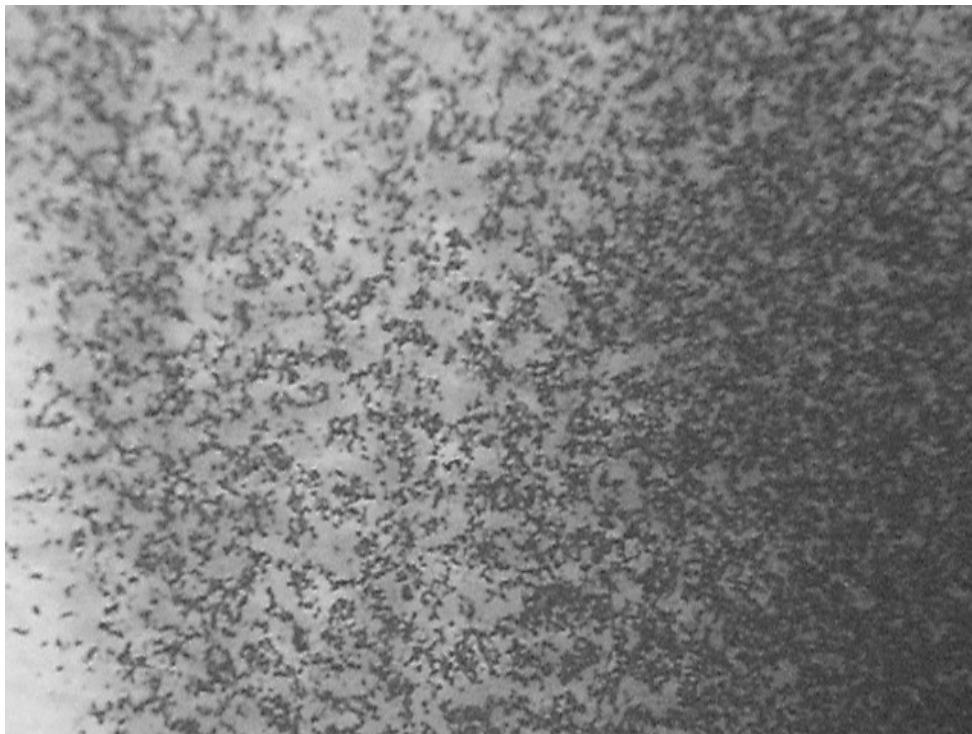


Рис. 1. Намагниченная пульпа



Рис. 2. Размагниченная пульпа

### **Список литературы**

1. Ломовцев Л.А., Нестерова Н.А., Дробченко Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. – М.: Недра, 1979. – 235 с.
2. Пилов П.И. Научные основы сепарации и водопотребления при обогащении руд. Докторская диссертация. – Днепропетровск, НГАУ, 1996.
3. Петрова Г.Н. Исследование порошкообразных магнетитов // Изв. АН СССР. Серия географическая и геофизическая. – 1948. – №6, Т.12. – С. 549-556.
4. Младецкий И.К. Основы прогнозирования выходных показателей разделения флокулирующих материалов при мокрой магнитной сепарации: Дисс. ... д-ра техн. наук. – Днепропетровск, 1992. – 294 с.

© Березняк А.А., Младецкий И.К., Пайва Э.М., 2014

*Надійшла до редколегії 23.09.2014 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*