

И.К. МЛАДЕЦКИЙ, д-р техн. наук
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),
Э.М. ПАЙВА
(Ангола, Горнорудное общество "Катока")

РАЗМЕР ЧАСТИЦ МАГНИТНОГО УТЯЖЕЛИТЕЛЯ ПОСЛЕ ВЫХОДА ИХ ИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Размагничивание утяжелителей из сильномагнитного концентрата применяют с целью уменьшения размеров частиц этого утяжелителя, который имеет достаточно сильную склонность к флокуляции. Размагничивание осуществляют в переменном магнитном поле достаточной интенсивности с частотой 50 Гц в потоке пульпы.

Магнитное поле создают набором электрических катушек, охватывающих поток пульпы и достаточно близко расположенных друг от друга. Катушки имеют уменьшающееся количество витков от одного конца аппарата к другому. В результате образуется равномерное переменное магнитное поле с уменьшающейся амплитудой от входа потока пульпы к выходу его из аппарата.

Для регенерации магнитной суспензии применяют барабанные магнитные сепараторы с магнитной системой, чередующейся полярности. Отработанный утяжелитель проходит регенерацию, а затем размагничивание. Рассмотрим, каким образом происходит такое размагничивание

Рассмотрим действие переменного магнитного поля на магнитные пряди или частицы. Все они имеют вытянутую форму, близкую к эллипсоиду вращения с соотношением длин большой оси к малой $\Lambda=2$ [1]. Частица осью легкого намагничивания (длинной осью) ориентируется вдоль вектора внешнего магнитного поля. В переменном магнитном поле частица следует за изменением этого вектора. Магнитная сила, которая ориентирует частицу, равна [1]:

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

где κ_a, κ_b – объемные магнитные восприимчивости частицы вдоль длинной и короткой осей; α – угол между вектором напряженности и длинной осью частицы.

Величины κ_a, κ_b зависят от соотношения длин осей частицы Λ , т.е. от размагничивающего фактора вдоль каждой из осей

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

Магнітна і електрична сепарація

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

А связь между магнитными восприимчивостями вещества и тела определяется соотношениями

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

Препятствует перемещению частицы сила вязкости. Поскольку происходит вращение частицы, то $U = 2\pi\omega d$, уравнение движения имеет вид $F_\mu = F_{M1}$.

Учитывая, что $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$, имеем

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

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

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

решение которого имеет вид

$$\ln(\csc \alpha - \operatorname{ctg} \alpha) = - \frac{B}{A} t + \ln C. \quad (3)$$

Начальные условия выбираем из таких соображений. Допустим, что поле мгновенно изменяется от $-H_1$ до $+H_1$. Частицы, естественно не успевают за этим полем и начальный угол составит $\alpha_0 = \pi$, тогда

$$\ln(\csc \pi - \operatorname{ctg} \pi) = \ln C,$$

т.е. $\csc \pi = -1$; $\operatorname{ctg} \pi = -\infty$, значит $\ln C = 0$; $C = 1$. При этом окончательное решение уравнения (3) примет вид

$$\csc \alpha - \operatorname{ctg} \beta = \exp\left(-\frac{B}{A} t\right). \quad (4)$$

Упростим последнее выражение, для чего тригонометрические функции выразим через синус и косинус, т.е.

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

тогда $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \exp(-\frac{B}{A}t)$. Максимальный угол отставания частицы от вектора магнитного поля составляет 180° , т.е. π откуда

$$\alpha = 4 \operatorname{arctg} \exp(-\frac{B}{At}). \quad (5)$$

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

$$\alpha = 4 \operatorname{arctg} \exp(-\frac{B}{A}\omega).$$

Проведем оценку полученной зависимости при таких исходных данных: $H=10^4$ А/м; $\kappa_M = 10$; $\Lambda=2$, при этом $N_a = 0,77$; $N_b = 5,3$; $\kappa_a = 1,15$; $\kappa_b = 0,18$; $A = 0,113$; $B = 126$.

$$\alpha = 4 \operatorname{arctg} \exp(-557\omega).$$

Таблица 1

Угол запаздывания поворота частицы к вектору внешнего переменного магнитного поля										
Гц	10	50	100	500	1000	3000	5000	10000	50000	100000
град	0	0	1	72	120	160	168	172	176	177

Таким образом, частицы утяжелителя, при частотах до 100 Гц практически успевают следовать за вектором внешнего магнитного поля без запаздывания. Свыше 1000 Гц запаздывание значительное составляет более 90° и начинается перемагничивание частиц. При частоте 10 кГц имеем достаточные условия для перемагничивания частиц.

Угол запаздывания может быть использован в качестве мерил размагниченности частиц: $K_{PA3} = \sin(\varphi - 90)$, поскольку размагничивание начинается тогда, когда составляющая вектора внешнего магнитного поля начинает иметь противоположное направление вектору намагниченности частицы.

Рассмотрим, каким образом изменяется размер флоккул в таких переменных полях.

Сила осевого сжатия выражается уравнением [1]

$$F_{OC} = \frac{(S\kappa H)^2 k\mu_0}{4a^2(1 + \kappa_a N_a)^2}, \quad (6)$$

Магнітна і електрична сепарація

где поперечное сечение флокулы $S = \frac{\pi b^2}{4}$, причем $\frac{a}{b} = 2$

Выразим поперечное сечение через размер частиц: $n = \frac{4\pi b^2}{4\pi d^2} = \frac{b^2}{d^2}$, т.е.
 $b^2 = nd^2$.

Разрушает флокулу турбулентные мелкомасштабные пульсации с силой вязкости

$$F_{\mu} = 3\pi\mu\sigma a.$$

Условие равновесия флокулы составляют

$$aF_{\mu} = bF_{OC}.$$

С учетом (6) получаем соотношение

$$\frac{a^2 (d\kappa H)^2 n^2 k \mu_0}{4a^2 (1 + \kappa_a N_a)^2} = 2 \times 3\pi\mu\sigma a. \quad (7)$$

Отсюда имеем

$$\frac{(d\kappa H)^2 n^2 k \mu_0}{24\pi\mu\sigma (1 + \kappa_a N_a)^2} = a. \quad (8)$$

Обозначим $\frac{n^2 k}{24\pi} = G$, тогда

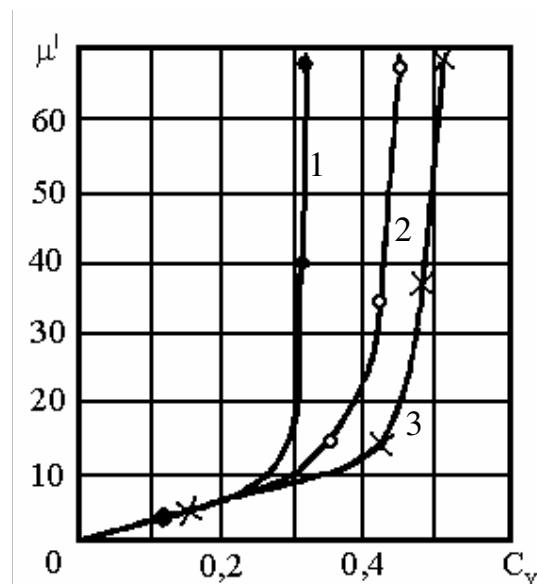
$$G \frac{(d\kappa H)^2 \mu_0}{\mu\sigma (1 + \kappa_a N_a)^2} = a. \quad (9)$$

Таким образом, размер флокул в переменном магнитном поле прямо пропорционален остаточной напряженности магнитного поля частиц, их магнитной восприимчивости и размеру частиц и обратно пропорционален вязкости среды и интенсивности турбулентных пульсаций.

Оценим размер флокул в зависимости от остаточной намагниченности частиц при таких условиях: $N=0,16$; $\kappa = 5$; $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$; $\mu = 1,2 \cdot 10^{-3}$; $\sigma = 1$; $G=3,7$; $d = 5 \cdot 10^{-5}$ (все размерности в системе Си). В соответствии с формулой (9) посчитаны данные, которые сведены в таблицу 2.

Размер флоккул, существующих за счет остаточной намагниченности частиц							
$H, \text{ А/м}$	0	10	50	100	500	1000	10000
$a, \text{ м}$	0	$3 \cdot 10^{-8}$	$75 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-2}$
$a, \text{ мм}$	0	0,00003	0,00075	0,003	0,075	0,1	30

Как следует из табл. 2 остаточная напряженность между 100 и 500 А/м уже будет увеличивать размер частиц утяжелителя в 2 раза, далее размеры флоккул резко увеличиваются снижая вязкость суспензии и ухудшая показатели разделения в тяжелосредном гидроциклоне.



Зависимость относительной вязкости магнетитовой суспензии μ от объемной концентрации твердой фазы C_v при значениях крупности 1 – 0,05; 2 – 0,075; 3 – 0,1 мм.

Когда магнитный утяжелитель остается неразмагниченым полностью, то его частицы имеют остаточную намагниченность (κH_C), за счет которой они объединяются во флоккулы и в результате размер частиц увеличивается. В работе [2] приведены исследования зависимости вязкости суспензии от крупности частиц утяжелителя. Получены графики зависимости вязкости суспензии от крупности частиц утяжелителя (рисунок). В соответствии с графиками, видно, что чем крупнее частицы, тем при большем объемном содержании его можно добиться требуемой вязкости суспензии. Так при средней крупности частиц суспензоида 0,1 мм получаем превышение его вязкости над вязкостью воды равное $C_v = 0,35$. Когда же крупность частиц соответствует 0,05 мм, то этой же вязкости добиваемся при $C_v = 0,25$. Таким образом, при изменении крупности утяжелителя в 2 раза происходит изменение требуемой концентрации на

$$\Delta = \frac{0,35 - 0,25}{0,35} = 0,14 \equiv 14\% .$$

Магнітна і електрична сепарація

Оценим, как это отражается на массовых величинах.

Соотношения, связывающие плотности составляющих суспензию и содержание твердого в ней имеют вид:

$$C_V = \frac{\delta_{II} - \delta_B}{\delta_T - \delta_B};$$

$$C_P = \frac{\delta_T(\delta_{II} - \delta_B)}{\delta_{II}(\delta_T - \delta_B)},$$

где индексы II , B , T – означают соответственно пульпу, воду и твердое.

Оценку будем проводить при $\delta_T = 7000 \text{ кг/м}^3$, $\delta_B = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Изменение плотности пульпы при изменении объемного содержания на 0,1 составит

$$\Delta\delta_{II} = \Delta C_V (\delta_T - \delta_B) = 6000 \times 0,1 = 600 \text{ кг/м}^3.$$

При этом массовое содержание твердого составит

$$C_{P1} = \frac{7(2,3 - 1)}{2,3(7 - 1)} = 0,65; \quad C_{P2} = \frac{7(2,9 - 1)}{2,9(7 - 1)} = 0,76.$$

Расход утяжелителя при таких плотностях составит:

$$\Delta Q_T = Q_B \left(\frac{C_{P1}}{1 - C_{P1}} - \frac{C_{P2}}{1 - C_{P2}} \right) = Q_B \left(\frac{0,65}{1 - 0,65} - \frac{0,76}{1 - 0,76} \right) = 1,31 Q_B,$$

т.е. увеличивается на 30%. (Q_B = расход воды).

Таким образом, для компенсации влияния крупности частиц суспензии необходимо увеличивать ее плотность, а значит и расход утяжелителя.

Список литературы

1. Кармазин В.В. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. – М.: МГУ, 2008. – Ч. 1. – 768 с.
2. Пилов П.И. Научные основы сепарации и водопотребления при обогащении руд: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Д.: НГАУ, 1996. – 36 с.

© Младецкий И.К., Пайва Э.М., 2012

*Надійшла до редколегії 12.01.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*