

**О.О. БЕРЕЗНЯК,**

**І.К. МЛАДЕЦЬКИЙ,** д-р техн. наук

(Україна, Дніпро, НТУ «Дніпровська політехніка»)

### **ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ РОЗМАГНІЧУВАННЯ ТОНКИХ ФЕРОМАГНІТНИХ ЧАСТИНОК**

Магнітна сепарація знайшла широке застосування при розділенні сумішей частинок, що володіють практично будь-якою магнітною сприйнятливістю. Особливо ефективним її застосування є при очищенні немагнітних концентратів від домішок. Проте, суттєвим недоліком магнітної сепарації є те, що частинки запам'ятовують вплив магнітного поля у вигляді залишкової індукції, що призводить до їхнього об'єднання в агрегати і флокули. В результаті наступні переміщення стають менш ефективними, і при малих вмістах нерудних частинок практично виключають отримання чистих концентратів.

Для того, щоб повторні операції сепарації або класифікації залишалися дієвими та ефективними, необхідно перед їх застосуванням повертати частинкам їх початкові магнітні властивості, тобто розмагнічувати. Застосовувати цю операцію слід безпосередньо в потоці частинок, тобто в потоці пульпи.

Чим менше розмір частинок, тим більш вони рухливі, а головною умовою розмагнічування є нерухоме положення частинки в просторі щодо вектора змінного магнітного поля, яке покликане розмагнічувати ці частинки. Розглянемо, в якому випадку можливе виконання цієї умови.

Частинки, наприклад, магнетитової руди, яка підготовлена для глибокого збагачення, мають витягнуту форму, близьку до еліпсоїда обертання, зі співвідношенням більшої осі  $a$  до меншої  $b$  близько двох:

$$A = \frac{a}{b} = 2.$$

Більша вісь є віссю легкого намагнічування, і в магнітному полі вона стає диполем з орієнтацією довгою віссю уздовж вектора зовнішнього магнітного поля.

Розглянемо рівновагу обертання такої частинки відносно малої осі з позицій рівняння руху:

$$m \cdot U = \Delta t \cdot \sum F.$$

Складові сил наступні:

– сила впливу зовнішнього магнітного поля  $H$ , що діє на кінці частинки:

$$F_M = \mu_0 \cdot \bar{\mu} \cdot \frac{\pi a^2}{4} \cdot H^2 \cdot \sin \alpha_1 \left[ \frac{H \cdot M^2 \cdot A^2}{A^2 \cdot M^2} = H \right];$$

де  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{H}{A^2}$  – абсолютна магнітна постійна;  $\bar{\mu}$  – магнітна проникність частинки, безрозмірна величина;  $\alpha_1$  – кут між віссю легкого намагнічування і вектором напруженості зовнішнього магнітного поля;

– сила в'язкості середовища:

$$F_\mu = 8 \cdot \pi \cdot \mu \cdot a \cdot U \left[ \frac{H \cdot c \cdot M \cdot M}{M^2 \cdot c} = H \right];$$

де  $\mu = 10^{-3} \frac{H \cdot c}{M^2}$  – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища (води);

$U$  – лінійна швидкість руху кінців частинки,  $\frac{M}{c}$ ;

– момент інерції частинки:

$$J = m \cdot R^2 = \frac{2}{3} \cdot \delta \cdot \pi \frac{a^2}{4} \cdot a \cdot \frac{a^2}{4} = \frac{\delta \cdot \pi}{24} \cdot a^5 \left[ \frac{кг \cdot M^3}{M^3} \cdot M^2 = кг \cdot M^2 \right];$$

де  $m$  – маса частинки, кг;  $\delta$  – щільність (питома вага) частинки,  $\frac{кг}{M^3}$ .

Лінійна швидкість переміщення кінців частинки залежить від того, на який кут  $\varphi$  повернеться частинка за момент часу  $\Delta t$  (тут і надалі  $\Delta$  – приріст):

$$U = \frac{\varphi \cdot a}{\Delta t}.$$

Сила інерції частинки складе:

$$F_j = J \cdot \frac{\Delta^2 \varphi}{\Delta t^2} = J \cdot \frac{\Delta \omega}{\Delta t}; \quad \omega = \frac{\varphi}{\Delta t}; \quad \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = -\frac{\varphi}{\Delta t^2};$$

$$F_j = J \cdot \frac{\Delta^2 \varphi}{\Delta t^2} = \frac{\pi \cdot \delta \cdot a^5}{24 \cdot \Delta t^2} \frac{\varphi}{2} = \frac{\pi \cdot \delta \cdot a^4 \cdot \varphi}{12 \cdot \Delta t^2} \left[ \frac{кг \cdot M^4}{M^3 \cdot c^2} = \frac{кг \cdot M}{c^2} = H \right]$$

Від'ємний знак вказує на напрямок дії цієї сили.

Складемо рівняння з урахуванням складових:

## Магнітна і електрична сепарація

$$\begin{aligned}\mu_0 \cdot \bar{\mu} \cdot \frac{\pi \cdot a^2}{4} \cdot H^2 - \frac{\pi \cdot \varphi}{12 \cdot \Delta t^2} \cdot \delta \cdot a^4 - 4 \cdot \pi^2 \cdot \mu \cdot a^2 \cdot \frac{\varphi}{\Delta t} &= 0; \\ \mu_0 \cdot \bar{\mu} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot H^2 \cdot \Delta t^2 - 4 \cdot \pi^2 \cdot \mu \cdot \varphi \cdot \Delta t - \frac{\pi}{12} \cdot \delta \cdot a^2 \cdot \varphi &= 0.\end{aligned}$$

Введемо позначення, попередньо прийнявши наступні вихідні дані:

$$\bar{\mu} = 9; H = 100 \frac{\text{кА}}{\text{м}}; \mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}; \mu = 10^{-3} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2};$$

$$\delta_M = 5000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \delta_H = 2800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \varphi = 0,174;$$

$$K_1 = \mu_0 \cdot \bar{\mu} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot H^2 = 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3,14}{4} \cdot 10^{10} \cdot \bar{\mu} = 0,989 \cdot 10^4 \cdot \bar{\mu} = 10\,000 \cdot \bar{\mu};$$

$$K_2 = 4 \cdot \pi^2 \cdot \mu \cdot \varphi = 4 \cdot 3,14^2 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi = 0,04 \cdot \varphi;$$

$$K_3 = \frac{\pi}{12} \cdot \delta \cdot a^2 = 0,26 \cdot \delta \cdot a^2 \cdot \varphi;$$

Таким чином:

$$K_1 \cdot \Delta t^2 - K_2 \cdot \Delta t - K_3 = 10\,000 \cdot \bar{\mu} \cdot \Delta t^2 - 0,04 \cdot \varphi \cdot \Delta t - 0,26 \cdot \delta \cdot a^2 \cdot \varphi = 0.$$

В такому разі:

$$t_{1,2} = \frac{0,04 \cdot \varphi \pm \sqrt{(0,04 \cdot \varphi)^2 + 4 \cdot 10\,000 \cdot \varphi \cdot \bar{\mu} \cdot 0,26 \cdot \delta \cdot a^2}}{2 \cdot 10\,000 \cdot \bar{\mu}}.$$

Кут  $\varphi$  вказує, на який кут повернеться частинка, якщо на неї діє імпульс вектора напруженості під кутом  $\alpha_1$  до осі легкого намагнічування.

Останній вираз пов'язує значення проміжку часу з заданим значенням кута повороту частинки, при цьому частота змінного магнітного поля складе:

$$\omega = \frac{1}{\Delta t}.$$

Магнітна проникність частинки (тіла) виражається через магнітну проникність речовини за допомогою формули Ліхтенекера:

$$\bar{\mu} = \mu^\alpha;$$

де показник  $\alpha$  являє собою вміст феромагнітного компонента в мінеральних частинках.

Щільність частинки залежить від співвідношення магнітної і немагнітної фаз, щільності яких виразимо відповідно через  $\delta_M, \delta_H$ :

$$\delta = \frac{\delta_M \cdot \delta_H}{\delta_M - \alpha_T \cdot (\delta_M - \delta_H)};$$

де  $\alpha_T$  – масова частка феромагнітної фази;

Або через об'ємну частку феромагнітного компонента:

$$\delta = \alpha \cdot (\delta_M - \delta_H) + \delta_H,$$

якщо вміст цінного мінералу виражений в об'ємних одиницях.

Визначимо порядок отриманого виразу для приросту часу при таких вихідних даних:  $\varphi = 10^\circ (0,174)$ ,  $\alpha_1 = 90^\circ (\sin \alpha_1 = 1)$ ,  $\delta_M = 5000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $\delta_H = 2800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $\bar{\mu} = 8^{0,5} = 2,9$ ,  $a = 2 \cdot 10^{-4}$  м.

Прийmemo об'ємний вміст феромагнітного компонента рівним 0,5.

У такому разі щільність зростка складе:

$$\delta = \alpha \cdot (\delta_M - \delta_H) + \delta_H = 0,5 \cdot (5000 - 2800) + 2800 = 3900.$$

А масовий вміст складе:

$$\alpha_T = \frac{\delta_M \cdot (\delta - \delta_H)}{(\delta_M - \delta_H) \cdot \delta} = \frac{5 \cdot (3,9 - 2,8)}{(5 - 2,8) \cdot 3,9} = 0,64.$$

Тоді розрахункове співвідношення набуде вигляду:

$$\Delta t = \frac{0,0068 + \sqrt{0,000646 + 1768 \cdot \bar{\mu} \cdot \delta \cdot a^2}}{20000 \cdot \bar{\mu}}.$$

У відповідності з даним виразом розраховані частоти розмагнічування для частинок різного розміру і магнітної сприйнятливості (табл. 1).

## Магнітна і електрична сепарація

Таблиця 1

Розрахункові значення частот розмагнічування

Вміст	Розмір, мм	$\Delta t$	$\omega$
0,1	0,01	1,726E-06	5,794E+05
	0,02	2,581E-06	3,875E+05
	0,05	5,548E-06	1,803E+05
	0,1	1,067E-05	9,369E+04
	0,2	2,100E-05	4,762E+04
0,3	0,01	1,282E-06	7,801E+05
	0,02	2,072E-06	4,825E+05
	0,05	4,672E-06	2,141E+05
	0,1	9,095E-06	1,100E+05
	0,2	1,798E-05	5,563E+04
0,5	0,01	9,817E-07	1,019E+06
	0,02	1,687E-06	5,926E+05
	0,05	3,927E-06	2,546E+05
	0,1	7,705E-06	1,298E+05
	0,2	1,528E-05	6,545E+04
0,7	0,01	7,642E-07	1,308E+06
	0,02	1,372E-06	7,288E+05
	0,05	3,260E-06	3,067E+05
	0,1	6,429E-06	1,555E+05
	0,2	1,278E-05	7,827E+04
0,8	0,01	6,876E-07	1,454E+06
	0,02	1,258E-06	7,950E+05
	0,05	3,014E-06	3,317E+05
	0,1	5,958E-06	1,678E+05
	0,2	1,185E-05	8,438E+04
0,9	0,01	6,157E-07	1,624E+06
	0,02	1,143E-06	8,750E+05
	0,05	2,757E-06	3,628E+05
	0,1	5,458E-06	1,832E+05
	0,2	1,086E-05	9,205E+04
1,0	0,01	5,530E-07	1,808E+06
	0,02	1,039E-06	9,626E+05
	0,05	2,519E-06	3,969E+05
	0,1	4,995E-06	2,002E+05
	0,2	9,949E-06	1,005E+05

Відповідно до розрахункових даних побудовані графіки (рис. 1) зміни частоти розмагнічування від параметрів частинок.

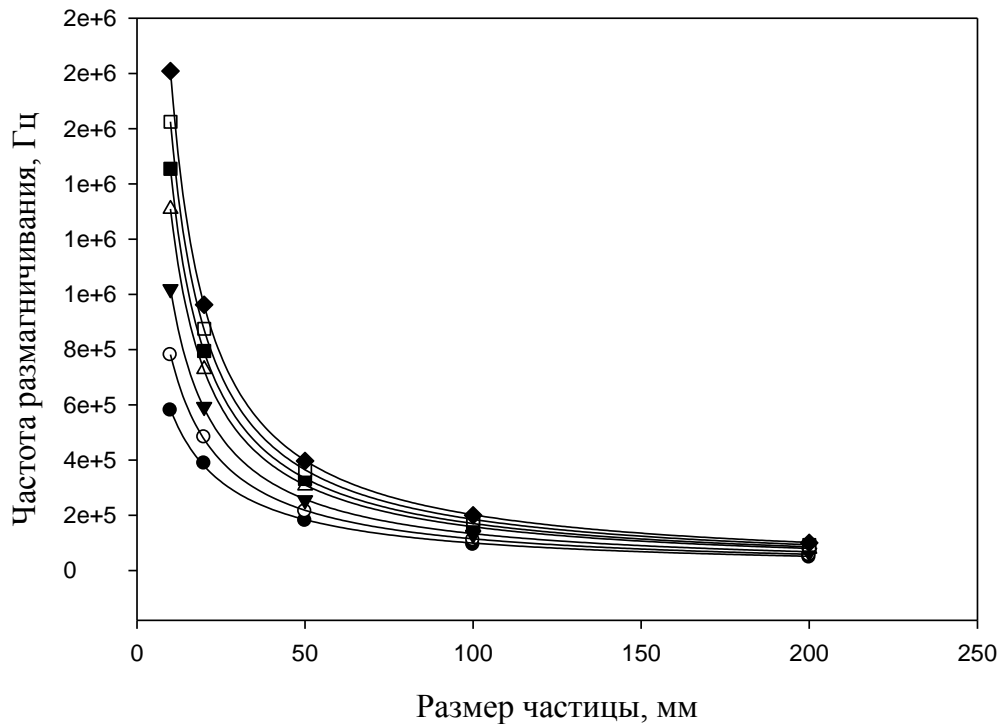


Рис. 1. Графіки залежностей частот розмагнічування частинки в залежності від їх розміру (діаметра) при різному вмісті феромагнітного компонента ( $\alpha$ ) в них:

● –  $\alpha = 0,1$ ; ○ –  $\alpha = 0,3$ ; ▼ –  $\alpha = 0,5$ ; ◇ –  $\alpha = 0,7$ ; ■ –  $\alpha = 0,8$ ; □ –  $\alpha = 0,9$ ; ◆ –  $\alpha = 1,0$

Як видно з графіків, частоти розмагнічування асимптотично наближаються до нуля при збільшенні розмірів і щільності частинки.

Експериментальні дослідження по розмагнічуванню магнетитовмісних пульп [1] показали повний якісний збіг з отриманими закономірностями, але в області малих значень розмірів частинки розрахункова частота розмагнічування виходить завищеною. В середньому, по інтервалу досліджень, розбіжність з експериментальними дослідженнями не перевищує 25%, що говорить про коректність теоретичних положень. Підбір відповідності з експериментом можна здійснити за допомогою коефіцієнтів.

### Список літератури

1. Березняк А.А. Экспериментальные результаты размагничивания магнетита в импульсном режиме / А.А. Березняк, Е.А. Березняк, М.Э. Гумеров, Д.А. Польша // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 50(91). – С. 111-114.

© Березняк О.О., Младецький І.К., 2019

Надійшла до редколегії 10.09.2019 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим