

MARIAN BROŻEK*

Analiza rozdziału w separatorze magnetycznym bębnowym

Wprowadzenie

Separatory bębnowe stanowią najbardziej rozpowszechniony typ separatorów magnetycznych do wzbogacania na sucho i na mokro surowców silnie magnetycznych, a w szczególności rud magnetytowych. Są również powszechnie stosowane do regeneracji obciążnika magnetycznego w oddziałach wzbogacania w cieczy zawieszinowej. Na przestrzeni kilkudziesięciu lat powstało wiele konstrukcji separatorów bębnowych (Kihlstedt, Skold 1960; Svoboda 1987; Pilch 1976). Ich wspólną cechą jest układ magnesów trwałych bądź elektromagnesów o zmiennej polarności, uszeregowany na powierzchni cylindrycznej.

Wyniki rozdziału w separatorach bębnowych są zależne od szeregu czynników, takich jak: wydajność separatora (Egorov 1969b), zawartości części stałych w zawieszynie do separacji (Egorov 1964), natężenie i rozkład pola magnetycznego nad powierzchnią bębna (Egorov 1969a), prędkości obrotowej bębna (Karmazin, Karmazin 1978), uziarnienia nadawy oraz rozkładu właściwości magnetycznych w nadawie. Wpływ uziarnienia stanowi ograniczenie zastosowań separatorów bębnowych do wzbogacania na sucho materiałów drobnoziarnistych. W peryferyjnych zastosowaniach do wzbogacania materiałów drobnoziarnistych na sucho można zastosować separatory płytowe ze zmiennym, wędrującym polem magnetycznym (Brożek 1999, 2005).

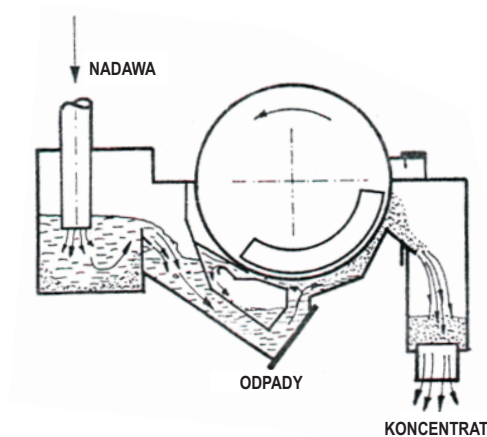
Rozkład pola magnetycznego ma zasadniczy wpływ na gęstość siły magnetycznej działającej na ziarno i której wartość jest zależna od parametrów układu magnetycznego. Temu problemowi poświęconych zostało wiele prac (Karmazin 1962; Bielskij 1967a,b; Tolmacev, Fainstein 1972; Birss i in. 1979). W następnym rozdziale przedstawiony jest rozkład pola

* Prof. dr hab., Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, e-mail:brozek@agh.edu.pl

magnetycznego (w przestrzeni nad powierzchnią bębna), wyznaczony z rozwiązania równania Laplace'a.

1. Pole magnetyczne w separatorach bębnowych

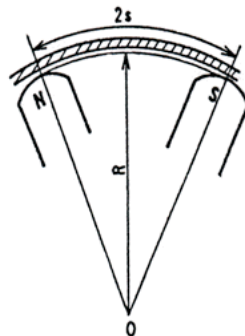
Na rysunku 1 przedstawiony jest schemat separatora bębnowego. W zależności od tego czy separator pracuje na sucho czy na mokro nadawa podawana jest na powierzchnię bębna



Rys. 1. Schemat separatora bębnowego do pracy na mokro

Fig. 1. Schematic diagram of the wet drum separator

lub pod bęben. Należy wyznaczyć rozkład pola magnetycznego nad powierzchnią bębna. W tym obszarze pole ma charakter bezwirowy i potencjał pola spełnia równanie Laplace'a. Otwarty układ magnetyczny ma symetrię cylindryczną (rys. 2). Zaniedbując niejednorod-



Rys. 2. Otwarty układ magnetyczny na powierzchni bębna

Fig. 2. Diagram of the open magnetic system on the cylinder surface

ność pola magnetycznego w kierunku równoległym do osi bębna (na krawędziach powierzchni bębna) dla wyznaczenia potencjału pola magnetycznego wystarczy rozwiązać równanie Laplace'a w układzie biegunowym. Równanie to jest następujące (Karaśkiewicz 1971):

$$\frac{\partial^2 V(r, \varphi)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V(r, \varphi)}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (1)$$

gdzie

r i φ – zmienne niezależne w układzie biegunowym.

Przy założeniu, że potencjał pola jest iloczynem dwóch funkcji, czyli $V(r, \varphi) = R(r)\Phi(\varphi)$ otrzymuje się z równania (1) dwa równania różniczkowe zwyczajne dla funkcji $R(r)$ i $\Phi(\varphi)$:

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} - l^2 R = 0 \quad (2a)$$

$$\frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} + l^2 \Phi = 0 \quad (2b)$$

gdzie:

l – stała dowolna.

Rozwiązania tych równań są następujące (Karaśkiewicz 1971):

$$R(r) = c_1 r^l + c_2 r^{-l} \quad (3a)$$

$$\Phi(\varphi) = c_3 \exp(il\varphi) + c_4 \exp(-il\varphi) \quad (3b)$$

gdzie:

c_1, c_2, c_3, c_4 – stałe dowolne.

W związku z tym ogólne rozwiązanie równania (1) wyraża się wzorem:

$$V(r, \varphi) = (c_1 r^l + c_2 r^{-l}) [c_3 \exp(il\varphi) + c_4 \exp(-il\varphi)] \quad (4)$$

Po narzuceniu warunku brzegowego: $\lim_{r \rightarrow \infty} V(r, \varphi) = 0$ otrzymuje się $c_1 = 0$.

Fizyczne znaczenie ma część rzeczywista bądź urojona wyrażenia (4). Zatem rozwiązanie ostateczne równania (1) jest następujące:

$$V(r, \varphi) = cr^{-l} \cos l\varphi \quad (5)$$

Potencjał jest funkcją okresową zmiennej φ o okresie $T = \frac{2S}{R}$ (patrz rys. 2), czyli

$$V(r, \varphi) = V\left(r, \varphi + \frac{2S}{R}\right) \quad (6)$$

Po uwzględnieniu (5)

$$cr^{-l} \cos l\varphi = cr^{-l} \left(\cos l\varphi \cos l \frac{2S}{R} - \sin l\varphi \sin l \frac{2S}{R} \right) \quad (7)$$

Aby lewa strona równała się prawej muszą być spełnione następujące warunki:

$$\cos l \frac{2S}{R} = 1$$

$$\sin l \frac{2S}{R} = 0$$

Na podstawie powyższych warunków stała l jest równa:

$$l = \frac{\pi R}{S} \quad (8)$$

Składowe wektora natężenia pola magnetycznego w układzie biegunowym wyrażają się wzorami (Moon, Spencer 1966):

$$H_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = Cr^{-l-1} \cos l\varphi \quad (9a)$$

$$H_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} = Cr^{-l-1} \sin l\varphi \quad (9b)$$

Wartość bezwzględna natężenia pola jest równa:

$$H = \sqrt{H_r^2 + H_\varphi^2} = Cr^{-l-1} \quad (10)$$

gdzie: $C = cl$.

Stałą C można wyliczyć przez narzucenie warunku brzegowego. Na powierzchni bębna czyli dla $r = R$:

$$H(r=R) = H_o = H_m \cos l\varphi \quad (11)$$

Z warunku tego otrzymuje się:

$$C = H_m R^{l+1} \cos l\varphi \quad (12)$$

gdzie:

H_o – natężenie pola magnetycznego na powierzchni bębna,

H_m – maksymalna wartość natężenia pola.

Ostatecznie zatem wartość bezwzględna natężenia pola magnetycznego nad powierzchnią bębna separatora oraz jej kwadrat są następujące:

$$H = H_m \left(\frac{R}{r} \right)^{l+1} \cos l\varphi \quad (13)$$

$$H^2 = H_m^2 \left(\frac{R}{r} \right)^{2(l+1)} \cos^2 l\varphi \quad (14)$$

Wyliczony tutaj rozkład pola magnetycznego nie uwzględnia obecności ziaren produktu magnetycznego na powierzchni bębna. Obecność tych ziaren zwiększa natężenie pola magnetycznego w pobliżu bębna w zależności od grubości warstwy tych ziaren na powierzchni bębna oraz zawartości magnetytu w produkcie (Kvaskov i in. 1969).

2. Rozkład siły magnetycznej i optymalna podziałka biegunów

Wektory składowych siły magnetycznej działającej na jednostkę objętości ziarna są następujące:

$$\vec{f}_r = \frac{1}{2} \mu_o \kappa \frac{\partial H^2}{\partial r} \vec{e}_r = -\frac{1}{2} \mu_o \kappa H_m^2 (2l+2) R^{2(l+1)} r^{-2l-3} \cos^2 l\varphi \vec{e}_r \quad (15a)$$

$$\vec{f}_\varphi = \frac{1}{2} \mu_o \kappa \frac{1}{r} \frac{\partial H^2}{\partial \varphi} = -\frac{1}{2} \mu_o \kappa H_m^2 R^{2(l+1)} r^{-2l-3} l \sin 2l\varphi \vec{e}_\varphi \quad (15b)$$

gdzie:

\vec{e}_r i \vec{e}_φ – wektory jednostkowe odpowiednio w kierunku wzrostu promienia wzdłużającego r oraz kąta φ .

Jak wynika z powyższych wzorów składowa \vec{f}_r siły magnetycznej jest zwrócona do powierzchni bębna natomiast składowa \vec{f}_φ ściąga ziarna magnetyczne do środka symetrii powierzchni nabiegunnika.

Współczynnik niejednorodności pola magnetycznego w układzie biegunowym jest równy:

$$k = \left. \frac{\frac{dH}{dr}}{H} \right|_{r=R, \varphi=0} \quad (16)$$

Wartość k liczy się dla $r = R$, gdyż podziałka biegunów jest mierzona po powierzchni bębna. Po uwzględnieniu (13) i (8) otrzymuje się:

$$k = \frac{l+1}{R} = \frac{\pi}{S} + \frac{1}{R} \quad (17)$$

Wartość stałej k jest więc zależna zarówno od podziałki biegunów jak i od promienia bębna. Dla powierzchni płaskiej $R = \infty$ i $k = \frac{\pi}{S}$.

Wartość średnia względem zmiennej φ składowej f_r siły magnetycznej przedstawia się następująco:

$$\vec{f}_r = -\frac{1}{4} \mu_o \kappa H_m^2 (2l+2) R^{2(l+1)} r^{-2l-3} \quad (18)$$

Wartość maksymalna tej siły czyli $\vec{f}_r(r=R) = \vec{f}_{r\max}$ jest równa:

$$\vec{f}_{r\max} = \frac{1}{2} \mu_o \kappa H_m^2 \frac{l+1}{R} = \frac{1}{2} \mu_o \kappa H_m^2 k \quad (19)$$

Wyrażenie (19) jest analogiczne do wyrażenia na średnią wartość siły działającej na ziarno w separatorze taśmowym dla $y = 0$ (Brożek 2003). Różnią się one jedynie formułami na współczynnik niejednorodności pola. W związku z tym dla uproszczenia rachunków mających na celu wyliczenie składowej radialnej siły magnetycznej działającej na ziarno o średnicy d posłużono się wzorem (20), analogicznym jak dla separatora taśmowego (Brożek 2003). Jak wykazały pomiary (Hopstock 1975) takie podejście daje dobre przybliżenie wartości siły działającej na ziarno.

Siła ta jest równa:

$$F_r = \int_{\Delta}^{\Delta+d} \frac{1}{2} \mu_o \kappa H_m^2 k e^{-2ky} dy = \frac{1}{4} \mu_o \kappa H_m^2 e^{-2k\Delta} (1 - e^{-2kd}) \quad (20)$$

Przyrównując do zera pierwszą pochodną funkcji F_r względem k otrzymuje się:

$$\frac{\partial F_r}{\partial k} = \mu_o \kappa H_m^2 e^{-2k\Delta} [(\Delta + d)e^{-2kd} - \Delta] = 0 \quad (21)$$

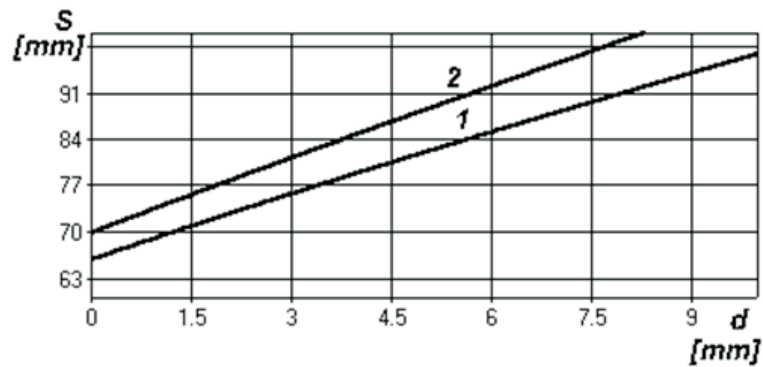
skąd

$$k = \frac{\ln\left(\frac{\Delta + d}{\Delta}\right)}{2d} \quad (22)$$

Po uwzględnieniu zależności (17) uzyskuje się wyrażenie na optymalną podziałkę biegunów:

$$S = \frac{2\pi R d}{R \ln\left(\frac{\Delta + d}{\Delta}\right) - 2d} \quad (23)$$

Na rysunku 3 przedstawiono zależność podziałki biegunów od wielkości ziarna dla dwóch wartości promienia bębna. Jak widać z tego rysunku w separatorach z większymi promieniami bębna podziałka biegunów niezbędna dla zapewnienia określonej wartości siły magnetycznej powinna być mniejsza niż w separatorach o bębnach mniejszych.

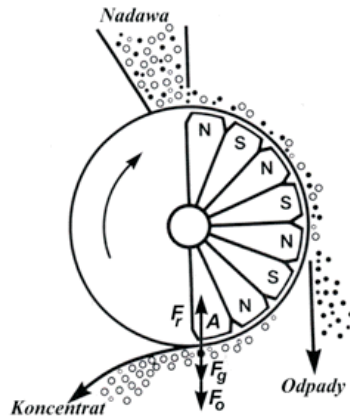


Rys. 3. Zależność podziałki biegunów od wielkości ziarna:
1) $-R = 0,45$ m, 2) $-R = 0,20$ m

Fig. 3. Dependence of the pole pitch upon the particle size:
1) $-R = 0.45$ m, 2) $-R = 0.20$ m

3. Bilans sił działających na ziarno

Na rysunku 4 pokazany jest schemat bębna separatora wraz z układem magnetycznym i rozkładem sił działających na ziarno.



Rys. 4. Schemat bębna separatora do pracy na sucho

Fig. 4. Schematic diagram of the dry drum separator

Na ziarno działa układ trzech sił: siła magnetyczna F_r , siła odśrodkowa F_o i siła ciężkości F_g . W punkcie **A** na rysunku 4 składowa radialna siły pola grawitacyjnego działającej na ziarno ma wartość maksymalną i ma ten sam zwrot co i siła odśrodkowa. Aby ziarno trafiło do produktu magnetycznego wartość składowej radialnej siły magnetycznej musi być większa od wartości sumy sił – odśrodkowej i ciężkości:

$$F_r \geq F_o + F_g \quad (24)$$

gdzie:

$$F_o = m\omega^2 R = \frac{2}{3}\rho\pi^2 d^3 n^2 R \quad \text{siła odśrodkowa} \quad (25)$$

$$F_g = mg = \frac{\pi d^3}{6}\rho g \quad \text{siła ciężkości przy wzbogacaniu na sucho} \quad (26a)$$

$$F_g = \frac{\pi d^3}{6}(\rho - \rho_o)g \quad \text{siła ciężkości przy wzbogacaniu na mokro} \quad (26b)$$

m – masa ziarna,

n – prędkość obrotowa bębna separatora,

g – przyspieszenie ziemskie,

ρ_o – gęstość wody.

Podstawiając do wzoru (24) formuły (20), (25) i (26a) po przekształceniach otrzymuje się wyrażenie na podatność magnetyczną podziałową przy wzbogacaniu na sucho:

$$\kappa_p = \frac{\pi d^3 \rho (g + 4\pi n^2 R)}{3\mu_o H_m^2 e^{-2k(R+\Delta)} [(R + \Delta + d)e^{-2kd} - (R + \Delta)]} \quad (27)$$

Ziarna o podatności magnetycznej większej od podatności podziałowej umownie nazywa się ziarnami magnetycznymi, natomiast ziarna o podatności mniejszej ziarnami niemagnetycznymi.

W przypadku rudy magnetytowej podatność magnetyczna ziarna jest proporcjonalna do kwadratu zawartości objętościowej magnetytu (Karmazin i in. 1972; Brożek 1995):

$$\kappa_p = \kappa_m \lambda_m^2 \quad (28)$$

gdzie:

- κ_m – podatność magnetyczna czystego magnetytu,
- λ_m – zawartość objętościowa magnetytu w ziarnie.

Na podstawie wzorów (27) i (28) zawartość magnetytu w ziarnach podziałowych o podatności κ_p jest równa:

$$\lambda_m = \sqrt{\frac{\pi d^3 \rho (g + 4\pi n^2 R)}{3\mu_o \kappa_m H_m^2 e^{-2k(R+\Delta)} [(R + \Delta + d)e^{-2kd} - (R + \Delta)]}} \quad (29)$$

Zatem zawartość magnetytu – a więc i żelaza – w produktach rozdziału jest zależna od parametrów układu magnetycznego separatora (k, H_m) oraz promienia R i liczby obrotów bębna n .

4. Model rozdziału w separatorze bębnowym

Przy separacji na sucho materiałów gruboziarnistych nadawę podaje się na powierzchnię bębna, na której materiał układa się warstwowo. W związku z tym ziarna magnetyczne lub zrosty składnika magnetycznego ze skałą płonną bardziej oddalone od powierzchni bębna mogą trafiać do produktu niemagnetycznego. Chcąc odzyskać cały składnik magnetyczny należy przeprowadzić kilka lub kilkanaście separacji uzupełniających produktu niemagnetycznego. W trakcie każdej separacji część składnika magnetycznego zostanie wydzielona ze strumienia produktu niemagnetycznego. Z kolei przy separacji na mokro, zwłaszcza ziaren bardzo drobnych, należy wydłużać drogę separacji ze względu na małą prędkość ruchu ziaren.

Proces wielokrotnego wzbogacania przebiega w sposób ciągły. Ze strumienia głównego, którym może być produkt magnetyczny lub niemagnetyczny, w każdym stadium wzbogacania odprowadza się pewną ilość ziaren składnika niemagnetycznego (jeśli strumieniem głównym jest produkt magnetyczny) lub składnika magnetycznego (jeśli strumieniem głównym jest produkt niemagnetyczny). Wyprowadzenie modelu wzbogacania w obu przypadkach przebiega analogicznie, przy czym inna jest interpretacja występującej w modelu stałej prędkości separacji. W tej pracy podane zostanie wyprowadzenie modelu dla separacji składnika magnetycznego ze strumienia głównego, którym jest produkt niemagnetyczny.

W modelu wielokrotnego wzbogacania produkt niemagnetyczny wzbogacania w p -tej separacji stanowi nadawę do wzbogacania w $(p+1)$ -szej separacji. W każdej pojedynczej separacji materiał przebywa – w strefie działania pola magnetycznego – określoną drogę wzdłuż przestrzeni roboczej separatora, zwaną drogą separacji. Przy wzbogacaniu wielokrotnym efektywna długość drogi separacji jest proporcjonalna do liczby separacji.

Niech x oznacza efektywną długość drogi separacji. Następująca wielkość:

$$P(x > s) = f(s) \quad (30)$$

oznacza prawdopodobieństwo pozostawania ziarna magnetycznego w strumieniu głównym materiału do punktu s lub prawdopodobieństwo niewyseparowania ziarna magnetycznego do produktu magnetycznego na drodze separacji s , przy czym spełniony jest warunek:

$$f(0) = P(x > 0) = 1 \quad (31)$$

Niewyseparowanie ziarna magnetycznego na dwóch kolejnych odcinkach drogi efektywnej s i u ($s, u \geq 0$) jest parą zdarzeń niezależnych. Zatem prawdopodobieństwo niewyseparowania ziarna magnetycznego na łącznym odcinku drogi efektywnej $s + u$ będzie, na podstawie wzoru na prawdopodobieństwo całkowite, równe (Rozanow 1974):

$$P(x > s + u) = P(x > u) P(x > s) \quad (32)$$

$$f(s + u) = f(u) f(s) \quad (33)$$

Po zróżniczkowaniu wyrażenia (33) względem u (przy założeniu, że istnieje gęstość $f'(s+0)$, $s \geq 0$) otrzymuje się:

$$f'(s + u) = f(s) f'(u) \quad (34)$$

Dzieląc stronami równanie (33) przez (34) uzyskuje się:

$$\frac{f(s+u)}{f'(s+u)} = \frac{f(u)}{f'(u)} \quad (35)$$

Skąd przy $u = 0$

$$\frac{f'(s)}{f(s)} = -\mu_m \quad (36)$$

gdzie:

$-\mu_m = f'(0) \leq 0$, gdyż $f(0) = 1$ jest wartością maksymalną funkcji $f(s) = P(x > s)$, $s \geq 0$.

Z równania (36) po uwzględnieniu warunku (31) otrzymuje się następujące rozwiązanie:

$$f(s) = \exp(-\mu_m s) \quad (37)$$

Jak powiedziano wyżej, $f(s)$ oznacza prawdopodobieństwo niewyseparowania ziarna magnetycznego do produktu magnetycznego. Miarą tego prawdopodobieństwa będzie liczba ziaren magnetycznych znajdujących się w produkcie niemagnetycznym po przebyciu drogi s (liczba ziaren niewyseparowanych), do całkowitej liczby tych ziaren znajdujących się w nadawie:

$$f(s) = \frac{N_n(s)}{N(0)} \quad (38)$$

Zatem z wyrażenia (37) po uwzględnieniu (38) otrzymuje się:

$$N_n(s) = N(0) \exp(-\mu_m s) \quad (39)$$

W powyższych równaniach $N_n(s)$ oznacza liczbę ziaren magnetycznych znajdujących się w produkcie niemagnetycznym (strumieniu głównym) po przebyciu drogi s , natomiast $N(0)$ liczbę tych ziaren w nadawie.

Następująca wielkość:

$$N_m(s) = N(0) - N_n(s) = N(0)[1 - \exp(-\mu_m s)] \quad (40)$$

przedstawia liczbę ziaren magnetycznych wyseparowanych do produktu magnetycznego po przebyciu przez strumień główny drogi s . Całkowity uzysk tych ziaren w produkcie magnetycznym (do punktu s drogi efektywnej strumienia głównego) będzie równy:

$$\varepsilon_m(s) = \frac{N_m(s)}{N(0)} = 1 - \exp(-\mu_m s) \quad (41)$$

Jeżeli długość drogi separacji w pojedynczym stadium jest równa s_1 , wtedy po p stadiach efektywna droga separacji będzie równa $s = s_1 p$.

W takiej sytuacji wyrażenie (41) można zapisać następująco:

$$\varepsilon_m(p) = 1 - \exp(-\mu_m s_1 p) \quad (42)$$

gdzie:

μ_m – stała prędkości separacji ziaren magnetycznych.

Wartość s_1 jest zależna od typu i wymiarów przestrzeni roboczej separatorów stosowanych w konkretnym procesie technologicznym.

Ze wzoru (42) wynika, że przy wzrastającej liczbie stadiów (separacji uzupełniających) rośnie uzysk składnika magnetycznego w produkcie magnetycznym, dzięki czemu zmniejszają się straty tego składnika w produkcie niemagnetycznym.

Straty ziaren magnetycznych σ_m w produkcie niemagnetycznym po p separacjach są równe:

$$\sigma_m = 1 - \varepsilon_m = \exp(-\mu_m s_1 p) \quad (43)$$

Z drugiej strony straty ziaren magnetycznych wyrażają się wzorem (Stępiński 1964):

$$\sigma_m = \frac{\gamma_n(p)\theta(p)}{\alpha_m} \quad (44)$$

gdzie:

- $\gamma_n(p)$ – wychód produktu niemagnetycznego po p separacjach,
- $\theta(p)$ – zawartość składnika magnetycznego lub udział ziaren magnetycznych w produkcie niemagnetycznym,
- α_m – zawartość składnika magnetycznego lub udział ziaren magnetycznych w nadawie.

Równanie bilansu dla składnika magnetycznego przy podziale nadawy na dwa produkty, magnetyczny i niemagnetyczny, jest następujące:

$$\alpha_m = \gamma_n \theta + (1 + \gamma_n) \beta_m \quad (45)$$

gdzie:

- β_m – zawartość składnika magnetycznego lub udział ziaren magnetycznych w produkcie magnetycznym.

Z równań (43)–(45) zawartość składnika magnetycznego lub udział ziaren magnetycznych w produkcie niemagnetycznym po p separacjach jest równa:

$$\theta(p) = \frac{\beta_m \alpha_m \exp(-\mu_m s_1 p)}{\beta_m - \alpha_m + \alpha_m \exp(-\mu_m s_1 p)} \quad (46)$$

Ze wzoru (46) wynika, że ze wzrostem drogi separacji maleje udział ziaren magnetycznych w produkcie niemagnetycznym. Przy założeniu, że udział ziaren magnetycznych w produkcie magnetycznym jest równy $\beta_m = 1$, zawartość ziaren magnetycznych w produkcie niemagnetycznym jest równa:

$$\theta(p) = \left[1 + \frac{1 - \alpha_m}{\alpha_m} \exp(\mu_m s_1 p) \right]^{-1} \quad (47)$$

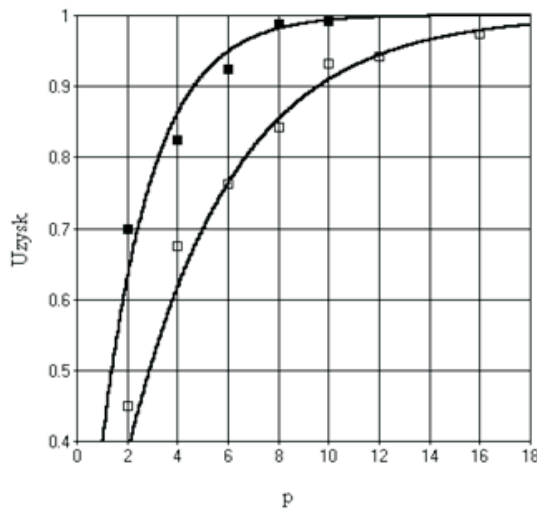
5. Weryfikacja modelu wielokrotnego wzbogacania

Weryfikację modelu przeprowadzono na podstawie danych zaczerpniętych z literatury. Bielskij (1984) wykonał badania przy użyciu separatora o promieniu $R = 0,45$ m, podziałce biegunów $S = 0,205$ m i prędkości obrotowej $n = 0,53$ s⁻¹, na rudzie o uziarnieniu 25–10 mm, przy dwóch wartościach natężenia pola magnetycznego: 60 kA/m oraz 133 kA/m. Przeprowadził wielostadialną separację uzupełniającą produktu niemagnetycznego po pierwszej separacji magnetycznej.

Na rysunku 5 przedstawione są zależności uzysku ziaren magnetycznych w produkcie magnetycznym od liczby separacji uzupełniających, dla dwóch wartości natężenia pola: 60 kA/m oraz 133 kA/m. Zależności te można aproksymować następującymi wzorami:

$$\varepsilon_m(p) = 1 - \exp(-0,24p) \quad \text{dla } H = 60 \text{ kA/m} \quad (48)$$

$$\varepsilon_m(p) = 1 - \exp(-0,495p) \quad \text{dla } H = 133 \text{ kA/m} \quad (49)$$



Rys. 5. Zależność uzysku ziaren magnetycznych w koncentracie od liczby separacji uzupełniających:
 □ – $H = 60$ kA/m, ■ – $H = 133$ kA/m

Fig. 5. Dependence of magnetic component recovery upon the number of the supplementary separations:
 □ – $H = 60$ kA/m, ■ – $H = 133$ kA/m

Jak widać z rysunku 5, zgodność modelu z doświadczeniem jest zadowalająca. Współczynnik liczbowy w wykładniku potęgi we wzorach (48) i (49) przedstawia iloczyn $\mu_m s_1$. Stała prędkości separacji składnika magnetycznego z produktu niemagnetycznego, przy natężeniu pola 133 kA/m, ma wartość około dwukrotnie wyższą niż przy natężeniu 60 kA/m.

Zależność zawartości składnika magnetycznego w produkcie niemagnetycznym od długości drogi separacji w pojedynczym stadium oraz liczby obrotów bębna badań Karmazin z zespołem (1968, za Svobodą 1987).

Przyjmując we wzorze (47) $p = 1$ otrzymuje się zależność zawartości składnika magnetycznego w produkcie niemagnetycznym od długości drogi separacji w pojedynczym stadium:

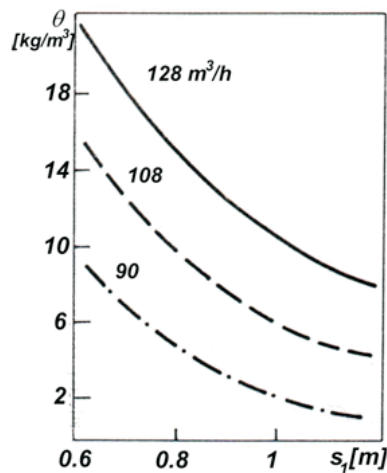
$$\theta(s_1) = \left[1 + \frac{1 - \alpha_m}{\alpha_m} \exp(\mu_m s_1) \right]^{-1} \quad (50)$$

Zależność ta była badana z zastosowaniem separatora bębnowego o promieniu $R = 0,45$ m oraz liczbie obrotów bębna $n = 0,15$ s^{-1} , na przykładzie rudy magnetytowej przy koncentracji magnetytu w zawieszynie 140 kg/m^3 .

Na rysunku 6 podane są zależności zawartości magnetytu w odpadach od długości drogi separacji w pojedynczym stadium dla kilku natężeń przepływu zawiesziny przez separator q . Zależności te według wzoru (50) są następujące:

$$\theta(s_1) = \frac{5000}{1 + 79,43 \exp(1,77s_1)} \quad \text{dla } q = 128 \text{ m}^3/\text{h} \quad (51a)$$

$$\theta(s_1) = \frac{5000}{1 + 74,67 \exp(2,4s_1)} \quad \text{dla } q = 108 \text{ m}^3/\text{h} \quad (51b)$$



Rys. 6. Zależność zawartości magnetytu w odpadach od długości drogi separacji i natężenia przepływu zawiesziny (Svoboda 1987)

Fig. 6. Dependence of magnetite content on the length of separation path and suspension feed rate (Svoboda 1987)

$$\theta(s_1) = \frac{5000}{1 + 45,94 \exp(3,9s_1)} \quad \text{dla } q = 90 \text{ m}^3/\text{h} \quad (51c)$$

Jak wynika z powyższych wzorów, wraz ze wzrostem natężenia przepływu zawiesiny stała prędkości separacji składnika magnetycznego maleje.

Jak już wspomniano wyżej, ze wzrostem wydajności rośnie grubość warstwy materiału na powierzchni bębna i dzięki zjawisku flokulacji magnetycznej pogarsza się jakość koncentratu przez obecność w strukturze flokuł ziaren niemagnetycznych, co w konsekwencji objawia się spadkiem stałej prędkości separacji.

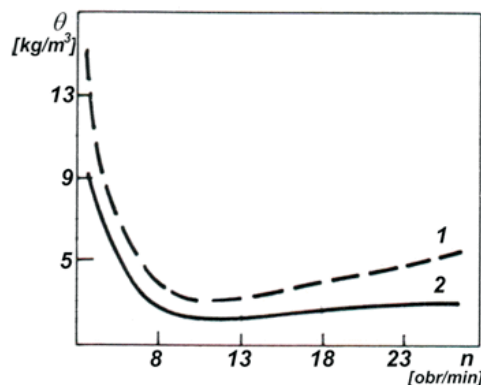
Wykorzystując empiryczną zależność zawartości składnika magnetycznego w produkcie niemagnetycznym od liczby obrotów bębna $\theta(n)$ oraz wzór (50) można wyznaczyć zależność stałej prędkości separacji składnika magnetycznego od liczby obrotów bębna.

Rysunek 7 podaje zależności $\theta(n)$ dla dwóch typów separatora: 1 – dla separatora współbieżnego, 2 – dla separatora przeciwbieżnego. Zależności te zdjęto z zastosowaniem separatora o promieniu bębna $R = 0,45$ m, długości drogi separacji w pojedynczym stadium $s_1 = 1,2$ m, zawartości magnetytu w zawieszynie 140 kg/m^3 oraz natężeniu przepływu zawiesiny $108 \text{ m}^3/\text{h}$. Ze wzoru (50) wynika, że stała prędkości separacji jest równa:

$$\mu_m = \frac{1}{s_1} \ln \frac{(1 - \lambda_m) \alpha_m}{\lambda_m (1 - \alpha_m)} \quad (52)$$

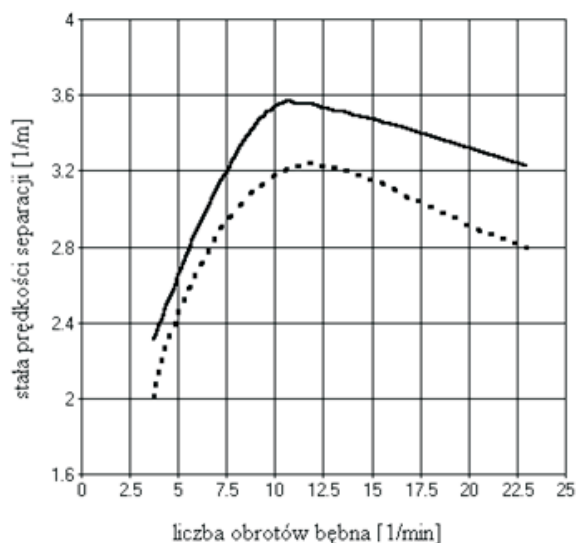
Posługując się wzorem (52) oraz danymi empirycznymi zaczerpniętymi z rysunku 7 wyliczono zależność stałej prędkości separacji od liczby obrotów bębna.

Na rysunku 8 wykreślono zależność stałej prędkości separacji od liczby obrotów bębna. Zależność ta ma maksimum. Taki typ zależności wynika z faktu, że ze wzrostem prędkości



Rys. 7. Zależność zawartości magnetytu w odpadach od liczby obrotów bębna: 1 – dla separatora współbieżnego, 2 – dla separatora przeciwbieżnego (Svoboda 1987)

Fig. 7. Dependence of magnetite content in the tailings on rotational speed of the drum: 1 – for concurrent separator, 2 – for counter-current separator (Svoboda 1987)



Rys. 8. Zależność stałej prędkości separacji składnika magnetycznego od liczby obrotów bębna:
 --- dla separatora współbieżnego, — dla separatora przeciwbieżnego

Fig. 8. Dependence of separation rate constant of magnetic component on rotational speed of the drum:
 --- for concurrent separator, — for counter-current separator

obrotowej bębna rośnie prędkość wyprowadzania ziaren magnetycznych z komory roboczej separatora aż do wartości maksymalnej. Przy dalszym wzroście prędkości obrotowej istotną rolę zaczyna odgrywać siła odśrodkowa, powodująca odrywanie ziaren od powierzchni bębna i ich powrót do komory roboczej separatora.

7. Uwagi końcowe

Przedstawiona w tej pracy analiza rozdziału, rozkładu pola magnetycznego i sił działających na ziarno oparte są na rozważaniach heurystycznych. Wyliczony parametr układu magnetycznego separatora (podziałka biegunów) przedstawia wartość optymalną, przy której siła działająca na ziarno o danej średnicy jest maksymalna.

Wyniki rozdziału są zależne od czasu przebywania ziaren nadawcy w przestrzeni roboczej separatora. W ciągłym procesie wzbogacania w układzie wielu separatorów, jest to równoznaczne z zależnością wyników rozdziału od całkowitej długości drogi separacji zdeteminowanej przez liczbę separatorów. Przedstawiony model rozdziału w połączeniu z równaniem bilansu daje możliwość wyznaczenia zależności wyników rozdziału od długości drogi separacji. Pozwala to na określenie zależności wyników rozdziału od liczby separacji uzupełniających.

Dla wyliczenia zależności stałej prędkości separacji składnika magnetycznego od wydajności procesu (na gruncie heurystyki) należy uwzględnić oddziaływania magnetyczne po-

między ziarnami. Natomiast dla określenia zależności stałej prędkości separacji od liczby obrotów bębna należałoby proces separacji magnetycznej rozważać jako stochastyczny proces narodzin i giniecia w ciągłym układzie wzbogacania. Będzie to przedmiotem dalszych badań.

Artykuł opracowany w ramach badań statutowych. Nr umowy w AGH 11.11.100.276

LITERATURA

- Bielskij A.A., 1967a – Silovye charakteristiki magnitnykh polej barabannykh separatorov. Obogascenie rud nr 2, s. 30–33.
- Bielskij A.A., 1967b – Priblizennyj metod rasceta charakteristik magnitnogo pola barabannogo separatora. Obogascenie rud nr 6, s. 40–42.
- Bielskij A.A., 1984 – Frakcionnyj magnitnyj analiz droblenoj rudy. Obogascenie rud nr 5, s. 16–19.
- Birss R.R., Parker M.R., Wong M.K., 1979 – Modeling of fields in magnetic drum separators. IEEE Trans. Magn. t. 15, s. 1305–1309.
- Brożek M., 1995 – The distribution of magnetic susceptibility in crushed ores. Magnetic and Electrical Separation t. 6, s. 213–228.
- Brożek M., 1999 – The physical model of magnetic separation in a plate separator. Magnetic and Electrical Separation t. 9, s. 149–167.
- Brożek M., 2003 – The distribution of magnetic field and forces in a band separator. Archives of Metallurgy t. 48, s. 479–495.
- Brożek M., 2005 – Analiza separacji magnetycznej w separatorach płytowych. Gosp. Sur. Min. t. 21, z. 1, s. 111–129.
- Egorov N.F., 1964 – Vlijanie plotnosti pitaniya barabannykh separatorov na kacestvo produktov obogaszczeniya železistykh kvarcitolov. Obogascenie rud nr 2, s. 5–8.
- Egorov N.F., 1969a – Vlijanie napražennosti pola na pokazateli raboty barabannykh magnitnykh separatorov. Obogascenie rud nr 1, s. 32–36.
- Egorov N.F., 1969b – Zavisimost technologiceskich pokazatelej barabannykh magnitnykh separatorov ot ich proizvoditelnosti. Obogascenie rud nr 3, s. 32–37.
- Hopstock D.M., 1975 – Fundamental aspects of design and performance of low-intensity dry magnetic separators. Trans. AIME, t. 258, s. 222–227.
- Karaśkiewicz E., 1971 – Zarys teorii wektorów i tensorów. Wyd. 2. Warszawa, PWN.
- Karmazin V.J., 1962 – Sovremennyye metody magnitnogo obogasceniya rud cernych metallov. Moskva, Nedra.
- Karmazin V.V., Karmazin V.I., Binkevich V.A., 1968 – Magnetic regeneration and separation in the beneficiation of ores and coal (in Russian). Moskva, Nedra.
- Karmazin V.J., Bynko V.A., Marjuta A.N., 1972 – Opredelenie zavisimosti magnitnoj pronicajemosti ot koncentracji ferromagnitnogo komponenta. Izv. VUZ Gornyj Zurnal nr 6, s. 168–171.
- Karmazin V.J., Karmazin V.V., 1978 – Magnitnyje metody obogasceniya. Moskva, Nedra.
- Kihlstedt P.G., Skold B., 1960 – Concentration of magnetite ores with dry magnetic separators of the Mortsell-Sala type. Proc. V IMPC, s. 691–704, London.
- Kvaskov A.P., Lomovcev L.A., Szczugol L.S., 1969 – Vlijanie silnomagnitnoj rudy na magnitnoje pole separatora. Obogascenie rud nr 1, s. 36–39.
- Moan G., Spencer D.E., 1966 – Teoria pola. Warszawa, PWN.
- Rozanov J.A., 1974 – Wstęp do teorii procesów stochastycznych. Warszawa, PWN.
- Pilch W., 1976 – Poradnik Górnika t. 5. Katowice, Wyd. Śląsk.
- Stępiński W., 1964 – Wzbogacanie grawitacyjne. Warszawa, PWN.

- S v o b o d a J., 1987 – Magnetic methods for the treatment of minerals. Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo, Elsevier.
- T o l m a c e v S.T., F a i n s t e i n E.G., 1972 – Rascet magnitnyh sistem barabannyh separatorov. Obogacenie rud nr 4, s. 34–38.

ANALIZA ROZDZIAŁU W SEPARATORZE MAGNETYCZNYM BĘBNOWYM

Słowa kluczowe

Separacja magnetyczna, separator bębnowy, rozkład pola magnetycznego, model rozdziału, stała prędkości separacji

Streszczenie

Separatory magnetyczne bębnowe stanowią najbardziej rozpowszechniony typ separatorów stosowanych w procesach wzbogacania rud magnetytowych oraz regeneracji cieczy zawiesinowych w układach wzbogacania grawitacyjnego w cieczach zawiesinowych. Efekty wzbogacania są zależne od szeregu czynników, takich jak: wydajność separatora, zawartość części stałych w zawieszynie, natężenie pola magnetycznego w przestrzeni roboczej separatora, prędkość obrotowa bębna, uziarnienie nadawy oraz rozkład właściwości magnetycznych w nadawie.

Ze względu na zjawisko flokulacji magnetycznej dla uzyskania produktów o określonej jakości stosuje się wielokrotne separacje czyszczące lub uzupełniające.

W artykule wyznaczono charakterystykę przestrzeni roboczej separatora magnetycznego w postaci rozkładu pola magnetycznego i siły magnetycznej działającej na ziarno, określono optymalną wartość podziałki biegunów układu magnetycznego separatora. Z bilansu sił wyliczono wartość podatności magnetycznej podziałowej przy wzbogacaniu na sucho oraz zawartość magnetytu w ziarnach podziałowych.

Dla przeprowadzenia analizy rozdziału opracowano model wielokrotnego wzbogacania w procesie ciągłym, uzyskując na jego podstawie ogólne wyrażenie na uzysk ziaren magnetycznych w produkcie magnetycznym po kilkukrotnych separacjach uzupełniających produktu niemagnetycznego oraz zależność zawartości składnika magnetycznego w produkcie niemagnetycznym od długości drogi separacji w pojedynczym stadium. Wykorzystując empiryczną zależność zawartości składnika magnetycznego w produkcie niemagnetycznym od liczby obrotów bębna, wyznaczono na podstawie modelu zależność stałej prędkości separacji składnika magnetycznego od liczby obrotów bębna.

ANALYSIS OF SEPARATION IN THE DRUM MAGNETIC SEPARATOR

Key words

Magnetic separation, drum separator, magnetic field distribution, separation model, separation rate constant

Abstract

Drum magnetic separators constitute the most common type of separators applied in the magnetic ore enrichment processes and in dense-medium recovery in the systems of gravitational enrichment in heavy medium suspensions. The separation effects depend on many factors, such as separator efficiency, content of solid parts in the suspension, magnetic field intensity in the separator working space, drum rotational speed, feed particle size and distribution of magnetic properties in the feed.

Due to the phenomenon of magnetic flocculation, multiple cleaning or supplementing separations are used to obtain products of fixed quality.

In the paper, by means of solving Laplace's equation in the polar system (Eqs 1 and 2), the author determined the characteristics of the working space in the magnetic separator in the form of magnetic field distribution (Eqs 9 and 13) and magnetic force acting upon the particle (Eqs 15a and 15b), determined the optimum value of pole pitch of the separator magnetic system (Eq 23). The dependence of pole pitch on particle size for two values of the drum radius was presented in Fig. 3. The value of magnetic separation susceptibility at dry enrichment was calculated from the force balance together with the content of magnetite in separation particles (Eqs 27 and 29, respectively).

The model of multiple separation in the continuous process was elaborated in order to execute the separation analysis, obtaining a general expression for the recovery of magnetic particles in the magnetic products after several supplementing separations of the non-magnetic product (Eq 42) as well as the dependence of the content of magnetic component in the non-magnetic product upon the length of separation path in a single stage (Eq 50). In equation (42) and (50) denotes the separation rate constant of magnetic particles. Applying the empirical dependence of content of the magnetic component in the non-magnetic product upon the number of drum rotations the author, according to the model, determined the dependence of separation rate constant of the magnetic components upon the number of drum rotations. Figure 8 presents this dependence.

The analysis of separation, presented in this article, is based upon heuristic considerations. Magnetic interactions between particles should be taken into account when calculating the dependence of the separation rate constant of the magnetic component upon the process efficiency. On the other hand, in order to determine the dependence of the separation rate constant upon the number of drum rotations, the separation process should be considered as a birth and death stochastic process in the continuous separation system.

