

MARIAN BROŻEK*

Analiza separacji magnetycznej w separatorach płytowych

Słowa kluczowe

Separator płytowy, przemienne pole magnetyczne, rozkład pola magnetycznego, model heurystyczny, separacja na sucho

Streszczenie

Magnetycznemu wzbogacaniu surowców drobnoziarnistych, szczególnie na sucho, towarzyszy zjawisko flokulacji magnetycznej, której intensywność jest zależna od własności magnetycznych składników separowanej mieszaniny. Dla zredukowania skutków tego zjawiska stosuje się między innymi separację w przemiennym polu magnetycznym. Takie pole generowane jest w separatorach płytowych z poruszającym się polem magnetycznym.

W artykule przeprowadzono analizę rozdziału w separatorach płytowych opierając się na heurystycznym modelu rozdziału. Wykorzystując rozwiązanie równań Maxwella wyznaczono rozkład pola magnetycznego i siły magnetycznej działającej na ziarno w przestrzeni roboczej separatora. Wychodząc z równania bilansu wszystkich sił działających na ziarno wyprowadzono zależność uzysku oraz zawartości składnika magnetycznego w produkcie magnetycznym od czynników wpływających na proces, takich jak: wielkość ziaren, gęstość ziaren magnetycznych, podatność magnetyczna ziaren magnetycznych i niemagnetycznych, natężenie pola magnetycznego, częstość zmian pola, właściwości powierzchniowe ziaren oraz długość drogi separacji. W wyprowadzonych wzorach zweryfikowano zależność uzysku od długości drogi separacji i właściwości magnetycznych składnika niemagnetycznego oraz zależność zawartości składnika magnetycznego w produkcie magnetycznym od wielkości ziaren, otrzymując dobrą zgodność z eksperymentem.

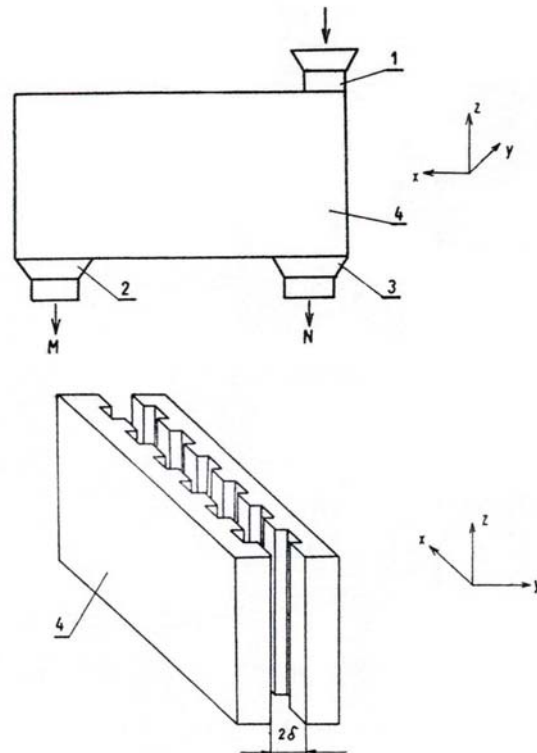
Wprowadzenie

Wzbogacanie magnetyczne surowców z drobnymi wprysnięciami fazy minerałów użytecznych wymaga uprzedniego, głębokiego rozdrabniania surowca celem uwolnienia mi-

* Dr hab., prof. AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

Recenzował dr hab. Tadeusz Tumidajski, prof. AGH

nerałów użytecznych. Ziarna minerałów silnie magnetycznych o rozmiarach wokółdomenowych uzyskują trwałe namagnesowanie nawet bez obecności pola magnetycznego. Ziarna większe uzyskują moment magnetyczny pod wpływem pola magnetycznego. Skutkiem tego jest magnetyczne oddziaływanie ziaren w polu magnetycznym. W związku z tym przy separacji magnetycznej surowców drobno uziarnionych o wysokiej wartości podatności magnetycznej zjawiskiem nieodłącznym, towarzyszącym procesowi separacji, szczególnie w stałym polu magnetycznym, jest zjawisko flokulacji magnetycznej, czyli tworzenie się agregatów ziarnowych, w których siłami mechanicznymi uwiecznione są ziarna skały płonnej (Mladeckij 1979). Prowadzi to do obniżenia dokładności rozdziału i pogorszenia jakości uzyskiwanego koncentratu magnetycznego. Dla zniwelowania skutków flokulacji prowadzi się wzbogacanie na mokro oraz wielokrotne separacje czyszczące produktu magnetycznego. Przy wzbogacaniu na sucho wpływ flokulacji magnetycznej na wyniki rozdziału jest jeszcze wyraźniejszy. Celem zminimalizowania skutków flokulacji magnetycznej przy wzbogaca-



Rys. 1. Schemat separatora płytowego

1 — podajnik nadawy, 2 — odbiornik frakcji magnetycznej, 3 — odbiornik frakcji niemagnetycznej,
4 — układ płyt rowkowanych

Fig. 1. Diagram of the plate separator

1 — feeder, 2 — magnetic product removal, 3 — non-magnetic product removal,
4 — system of furrowed plates

niu na sucho stosuje się wzbogacanie w przemiennych polach magnetycznych, generowanych w separatorach płytowych.

Na rysunku 1 pokazany jest schemat separatora płytowego (Pilch i in. 1972, 1975; Topolnicka 1978a, 1978b). Są to dwie płaskie płyty rowkowane wykonane z blach transformatorowych. W rowkach płyt znajduje się uzwojenie prądu trójfazowego, wytwarzające — analogicznie jak w uzwojeniu stojana silnika trójfazowego — trzy niezależne strumienie magnetyczne przesunięte w fazie o $2/3 \pi$. Strumień wypadkowy jest zatem analogiczny jak wirujące pole magnetyczne silnika trójfazowego. Pole magnetyczne zmieniające się w czasie i przestrzeni ma charakter falowy i porusza się wzdłuż płyt z określoną prędkością v . Pod wpływem sił tego pola flokuły magnetyczne poruszają się wzdłuż płyty separatora i w trakcie ruchu ulegają wielokrotnemu przemagnesowaniu, w trakcie którego ziarna niemagnetyczne wypadają ze struktury flokuł. Uzyskuje się dzięki temu wysokiej jakości koncentrat magnetyczny.

Dla przeanalizowania rozkładu w separatorze płytowym oraz określenia wpływu czynników związanych z parametrami pola magnetycznego, własnościami magnetycznymi ziaren wzbogacanego surowca, jego uziarnieniem w następnych rozdziałach wyznaczono rozkład pola magnetycznego oraz przedstawiono heurystyczny model procesu wzbogacania magnetycznego w separatorze płytowym.

1. Rozkład pola magnetycznego w separatorze dwupłytkowym

Rozkład pola magnetycznego w przestrzeni pomiędzy płytami wyznacza się korzystając z rozwiązania układu równań Maxwella przy określonych warunkach brzegowych.

Rozwiązując układ równań Maxwella otrzymuje się równanie falowe dla potencjału wektorowego pola magnetycznego \vec{A} (Feynman i in. 1974):

$$\vec{\Delta} \vec{A} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Są to w rzeczywistości trzy równania skalarne. Zostaną one zastosowane do układu dwóch płyt równoległych i nieskończenie rozciągłych. Na rysunku 1 pokazane jest położenie płyt separatora w układzie współrzędnych. Zakłada się, że względna przenikalność magnetyczna płyt jest nieskończenie duża oraz że prąd w rowkach płyt płynie w kierunku osi z . Wobec powyższych założeń wektory \vec{j} , \vec{A} i \vec{k} mają następujące składowe:

$$\vec{j} = (0,0,j) \quad \vec{A} = (0,0,A) \quad \vec{k} = (k,0,0)$$

gdzie:

$$\vec{k} \text{ — wektor falowy, przy czym, } |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda},$$

λ — długość fali,
 \vec{j} — wektor gęstości prądu.

Układ trzech równań (1) redukuje się w związku z tym do jednego równania, które wystarczy rozwiązać na płaszczyźnie (x,y) , gdyż prąd płynie w kierunku osi z :

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

Równanie to rozwiązuje się metodą rozdzielania zmiennych (Karaśkiewicz 1971), czyli zakłada się, że rozwiązanie ma postać:

$$A(x, y, t) = A_1(y)A_2(x)A_3(t) \quad (3)$$

Wstawiając rozwiązanie (3) do równania (2) otrzymuje się trzy równania różniczkowe zwyczajne:

$$\frac{d^2 A_3}{dt^2} + a^2 v^2 A_3 = 0 \quad (4a)$$

$$\frac{d^2 A_2}{dx^2} - 2a^2 A_2 = 0 \quad (4b)$$

$$\frac{d^2 A_1}{dy^2} - a^2 A_1 = 0 \quad (4c)$$

gdzie a jest stałą.

Rozwiązania tych równań są następujące:

$$A_3(t) = \exp(iavt)$$

$$A_2(x) = \exp(i\sqrt{2}ax)$$

$$A_1(y) = C_1 \cosh ay - C_2 \sinh ay$$

Zakładając, że $\omega = av$ (przy czym ω jest częstością kołową) stała a uzyskuje interpretację wektora falowego. Można więc napisać, że $a = k$.

Składowa z potencjału wektorowego A wyraża się zatem następującym wzorem:

$$A(x, y, t) = (C_1 \cosh ky - C_2 \sinh ky) \exp[i(\omega t - \sqrt{2}kx)] \quad (5)$$

przy czym C_1 i C_2 — stałe dowolne.

Wektor natężenia pola magnetycznego oraz jego składowe są równe (Svoboda 1987):

$$\vec{H} = \frac{1}{o} \text{rot } \vec{A} \quad (6a)$$

$$H_y = \frac{1}{o} \frac{A}{x} = i\sqrt{2}(C_1 \cosh ky - C_2 \sinh ky) \exp[i(\omega t - \sqrt{2}kx)] \quad (6b)$$

$$H_x = \frac{1}{o} \frac{A}{y} = (C_1 \sinh ky - C_2 \cosh ky) \exp[i(\omega t - \sqrt{2}kx)] \quad (6c)$$

$$H_z = 0 \quad (6d)$$

Stałe C_1 i C_2 wyznacza się korzystając z warunku, że na powierzchni płyty separatora $\text{rot } \vec{H} = \vec{j}$, czyli

$$\frac{H_y}{x} - \frac{H_x}{y} = j_1 \quad \text{dla } y = +\delta \quad (7a)$$

$$\frac{H_y}{x} - \frac{H_x}{y} = j_2 \quad \text{dla } y = -\delta \quad (7b)$$

przy czym 2δ jest szerokością szczeliny między płytami (rys. 1). Uwzględniając wyrażenia (6b) i (6c) otrzymuje się:

$$k(C_1 \cosh k\delta - C_2 \sinh k\delta) = j_1 \quad (8a)$$

$$k(C_1 \cosh k\delta - C_2 \sinh k\delta) = j_2 \quad (8b)$$

Z rozwiązania powyższego układu równań wartości stałych C_1 i C_2 są równe:

$$C_1 = \frac{j_1 - j_2}{2k \cosh k\delta} \quad (9a)$$

$$C_2 = \frac{j_1 + j_2}{2k \sinh k\delta} \quad (9b)$$

Jeżeli wartości prądów na obu płytach są takie same, czyli gdy $j_1 = j_2 = j$, wówczas stała $C_2 = 0$, natomiast stała C_1 jest równa:

$$C_1 = \frac{j}{k \cosh k\delta} \quad (10)$$

Znaczenie fizyczne ma część rzeczywista bądź urojona wyrażeń (6b) i (6c). Uwzględniając część rzeczywistą uzyskuje się ostatecznie formuły na składowe pola magnetycznego w przestrzeni pomiędzy płytami:

$$H_y = \frac{\sqrt{2}j}{k \cosh k\delta} \cosh ky \sin(\omega t - \sqrt{2}kx) \quad (11a)$$

$$H_x = \frac{j}{k \cosh k\delta} \sinh ky \cos(\omega t - \sqrt{2}kx) \quad (11b)$$

Przy ustalonym położeniu (x_o, y_o) wektor pola magnetycznego wiruje z częstością kołową ω , a koniec wektora opisuje elipsę o półosiach równych:

$$d_1 = \frac{\sqrt{2}j}{k \cosh k\delta} \cosh ky_o$$

$$d_2 = \frac{j}{k \cosh k\delta} \sinh ky_o$$

Kwadrat natężenia pola magnetycznego oraz składowe siły magnetycznej działającej na jednostkę objętości ziarna są odpowiednio równe:

$$H^2 = \frac{j^2}{k^2 \cosh^2 k\delta} \left[2 \cosh^2 ky \sin^2(\omega t - \sqrt{2}kx) + \sinh^2 ky \cos^2(\omega t - \sqrt{2}kx) \right] \quad (12)$$

$$\vec{f}_y = \frac{1}{2} \kappa \frac{H^2}{y} \vec{e}_y = \frac{\kappa j^2}{2k \cosh^2 k\delta} \sin 2ky \left[1 - \sin^2(\omega t - \sqrt{2}kx) \right] \vec{e}_y \quad (13a)$$

$$\vec{f}_x = \frac{1}{2} \frac{\omega \kappa H^2}{x} \vec{e}_x - \frac{\omega \kappa \sqrt{2} j^2}{2k \cosh^2 k\delta} \sin [2(\omega t - \sqrt{2}kx)] (1 - \cosh^2 ky) \vec{e}_x \quad (13b)$$

gdzie: \vec{e}_x i \vec{e}_y — wektory jednostkowe odpowiednio w kierunku osi x i y .

Należy zauważyć, że składowa \vec{f}_y siły magnetycznej zmienia znak przy zmianie znaku współrzędnej y . Oznacza to, że w przestrzeni roboczej między płytami ziarna produktu magnetycznego w zależności od tego, czy znajdują się w przedziale $(-\delta, 0)$ czy w przedziale $(0, \delta)$ będą przyciągane do jednej bądź drugiej płyty.

Składowa \vec{f}_x jest siłą transportującą ziarna magnetyczne wzdłuż szczeliny roboczej. Jak wynika ze wzorów (11a) i (11b), fala pola magnetycznego porusza się wzdłuż płyty separatora w dodatnim kierunku osi x . W wyrażeniu (13b) jest znak minus, co oznacza, że składowa \vec{f}_x transportuje ziarna magnetyczne w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu pola magnetycznego.

2. Rozkład pola magnetycznego w separatorze jednopłytkowym

W separatorze jednopłytkowym jest tylko jedna płyta o konstrukcji analogicznej jak płyty w separatorze dwupłytkowym. Rozkład pola magnetycznego nad powierzchnią płyty uzyskuje się analogicznie jak w separatorze dwupłytkowym. Rozwiązując układ równań (4) uzyskuje się następujące wyrażenie dla potencjału wektorowego pola (Brożek i in. 1983, 1985):

$$A(x, y, t) = [C_1 \exp(-ky) + C_2 \exp(ky)] \exp[i(\omega t - \sqrt{2}kx)] \quad (14)$$

Ponieważ pole magnetyczne powinno znikać przy oddalaniu się od powierzchni płyty, na rozwiązanie (14) narzuca się warunek brzegowy:

$$\lim_{y \rightarrow \infty} A(x, y, t) = 0 \quad (15)$$

Z warunku brzegowego (15) stała $C_2 = 0$. Zatem wektorowy potencjał pola jest następującą funkcją:

$$A(x, y, t) = C_1 \exp(-ky) \exp[i(\omega t - \sqrt{2}kx)] \quad (16)$$

Części rzeczywiste składowych natężenia pola magnetycznego, wyliczane analogicznie jak w poprzednim paragrafie, są następujące:

$$H_y = C \sqrt{2} e^{-ky} \sin(\omega t - \sqrt{2}kx) \quad (17a)$$

$$H_x = C e^{-ky} \cos(\omega t - \sqrt{2}kx) \quad (17b)$$

Stałą C we wzorach (17a) i (17b) wylicza się z następującego warunku brzegowego:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} \quad \text{dla } y = 0$$

czyli:

$$\frac{H_y}{x} - \frac{H_x}{y} = j \quad \text{dla } y = 0 \quad (18)$$

Uwzględniając wyrażenia (17a) i (17b) otrzymuje się: $C = \frac{j}{k}$.

Zatem ostatecznie rozkład pola magnetycznego nad powierzchnią płyty jest następujący:

$$H_y = \sqrt{2} \frac{j}{k} e^{-ky} \sin(\omega t - \sqrt{2}kx) \quad (19a)$$

$$H_x = \frac{j}{k} e^{-ky} \cos(\omega t - \sqrt{2}kx) \quad (19b)$$

Składowe siły magnetycznej działającej na jednostkę objętości ziarna wyrażają się wzorami:

$$\vec{f}_y = \frac{j^2}{k} e^{-2ky} [1 - \sin^2(\omega t - \sqrt{2}kx)] \vec{e}_y \quad (20a)$$

$$\vec{f}_x = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{j^2}{k} e^{-2ky} \sin 2(\omega t - \sqrt{2}kx) \vec{e}_x \quad (20b)$$

Jak widać ze wzorów (20), składowa \vec{f}_y przyciąga ziarna magnetyczne do powierzchni płyty, składowa \vec{f}_x natomiast transportuje te ziarna wzdłuż płyty w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu pola magnetycznego.

Na ziarna poruszające się wzdłuż płyty działa siła tarcia o zwrocie przeciwnym do zwrotu składowej \vec{f}_x . Siłą nacisku jest składowa \vec{f}_y . Aby transport ziaren magnetycznych po powierzchni płyty był możliwy, to siła tarcia musi być mniejsza od wartości składowej \vec{f}_x , czyli musi być spełniona nierówność:

$$v f_{y\max} < f_{x\max} \quad (21)$$

gdzie v jest współczynnikiem tarcia poślizgowego ziarna o powierzchnię płyty.

Z powyższego warunku oraz wzorów (20) można oszacować maksymalną wartość współczynnika tarcia ziaren o powierzchnię płyty:

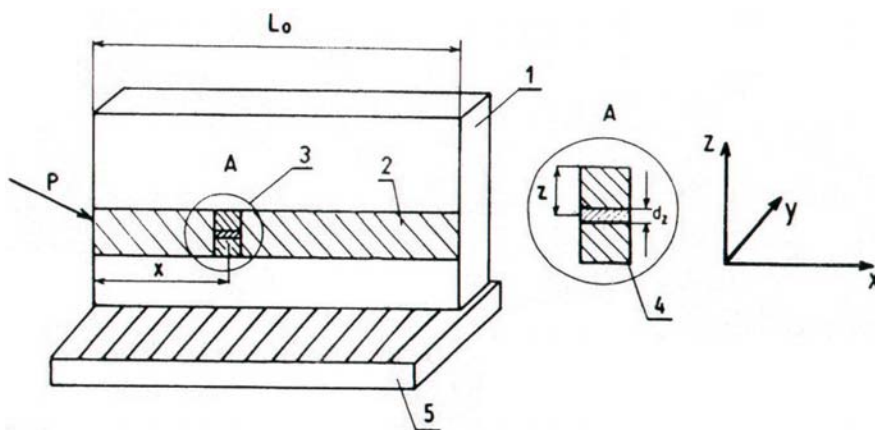
$$v \frac{f_{x\max}}{f_{y\max}} \approx 0,47 \quad (22)$$

W separatorach płytowych separuje się mieszaniny drobnoziarniste na sucho. Oprócz siły tarcia, uwarunkowanej polem magnetycznym, działa siła adhezji ziaren do powierzchni płyty. Z tego względu wartość współczynnika tarcia powinna być jeszcze mniejsza niż oszacowana we wzorze (22).

3. Analiza rozdziału w separatorze płytowym

3.1. Model rozdziału w separatorze płytowym

Na rysunku 2 przedstawiona jest schematycznie płyta separatora, na której zakreskowane pole stanowi płynący po powierzchni płyty wzdłuż osi y strumień cząstek magnetycznych i niemagnetycznych (strumień główny). Z tego strumienia w trakcie ruchu wypadają ziarna niemagnetyczne i przechodzą do produktu niemagnetycznego. Na rysunku 2 pokazano prostokątny fragment strumienia głównego. Fragment ten porusza się ruchem jednostajnym w kierunku osi x z prędkością v_x . Jednocześnie infinytezymalny pasek dz porusza się w dół



Rys. 2. Schemat płyty separatora płytowego

1 — płyta, 2 — strumień ziaren magnetycznych, 3 — fragment strumienia głównego poruszający się wzdłuż osi x , 4 — fragment poruszający się wzdłuż osi z , 5 — pojemniki na produkt niemagnetyczny

Fig. 2. Diagram of the plate of separator

1 — plate, 2 — stream of magnetic particles, 3 — fragment of the main stream, moving along the x -axis, 4 — fragment moving along the z -axis, 5 — containers for the non-magnetic product

z prędkością v_z . Z tego fragmentu ziarna niemagnetyczne, poruszając się w dół w kierunku z wraz z paskiem dz , pod wpływem siły ciężkości opuszczają flokulę cząstek magnetycznych (Brożek 1999a).

Niech całkowity potencjał oddziaływania pojedynczego ziarna niemagnetycznego z otaczającymi go ziarnami będzie równy V_c . Jeżeli w jednostce objętości nieskończenie małego paska dz po przebyciu odcinka z znajduje się n ziaren niemagnetycznych, to całkowita energia oddziaływania ziaren niemagnetycznych z otoczeniem będzie równa:

$$E(z) = n(z)V_c \quad (23)$$

Składowa z siły działającej na ziarno niemagnetyczne jest wyrażona wzorem:

$$F_z = \frac{dE(z)}{dz} = V_c \frac{dn(z)}{dz} \quad (24)$$

W powyższym wzorze potencjał oddziaływania nie podlega różniczkowaniu, gdyż nie zależy od zmiennej z . Od zmiennej z zależy natomiast liczba ziaren niemagnetycznych, gdyż w miarę trwania procesu rozdziału nieskończenie mały pasek dz przesuwał się wzdłuż osi z traci ziarna niemagnetyczne.

Oprócz sił potencjalnych na ziarno niemagnetyczne poruszające się wzdłuż osi z działa siła tarcia z otaczającymi ziarnami. Założono, że siła nacisku na ziarno niemagnetyczne jest co do wartości równa sile F_z wyrażonej wzorem (24). Siła tarcia będzie zatem równa:

$$F_T = \nu V_c \frac{dn(z)}{dz} \quad (25)$$

gdzie:

ν — współczynnik tarcia.

Oddziaływania charakteryzowane potencjałem V_c oraz siła tarcia przeciwdziałają wypadaniu ziaren niemagnetycznych z objętości flokuły. Siłą powodującą wypadanie ziaren niemagnetycznych z objętości flokuły jest siła ciężkości, która na jednostkę objętości jest równa:

$$F = mgn(z) \quad (26)$$

gdzie:

m — masa ziarna niemagnetycznego,

g — przyspieszenie ziemskie.

W warunkach równowagi suma sił (24) i (25) jest równa sile (26). Zatem:

$$mg n(z) - V_c \frac{dn(z)}{dz} - v V_c \frac{dn(z)}{dz} = 0 \quad (27)$$

Po przekształceniu wyrażenia (27) otrzymuje się następujące równanie różniczkowe:

$$\frac{dn(z)}{dz} + \frac{mg}{V_c(1-v)} n(z) = 0 \quad (28)$$

Rozwiązując równanie (28) uzyskuje się wyrażenie na liczbę ziaren niemagnetycznych, które znajdują się w jednostce objętości paska dz po przebyciu odcinka z :

$$n(z) = C \exp \left[-\frac{mg}{V_c(1-v)} z \right] \quad (29)$$

W powyższym wzorze C jest stałą dodatnią, wyznaczaną z warunku: $n(z=0) = N_o$, przy czym N_o jest liczbą ziaren niemagnetycznych w nadawie. Z warunku tego stała $C = N_o$.

Liczba ziaren niemagnetycznych, które opuściły pasek dz od poziomu 0 do poziomu z jest równa:

$$n(z) = N_o \left[1 - \exp \left[-\frac{mg}{V_c(1-v)} z \right] \right] \quad (30)$$

Ziarna te przeszły do produktu niemagnetycznego na odcinku $0-x$.

Ziarna niemagnetyczne we flokule, w trakcie pracy separatora, wykonują ruch złożony: w kierunku osi z oraz razem z całą flokulą w kierunku osi x . W czasie gdy pasek dz przesunie się o odcinek z flokuła pokona odcinek x . Wobec czego uzyskuje się następującą zależność:

$$z = \frac{v_z}{v_x} x \quad (31)$$

Po uwzględnieniu zależności (31) wyrażenie (30) przyjmuje postać:

$$n(x) = N_o \left[1 - \exp \left[-\frac{mg}{V_c(1-v)} \frac{v_z}{v_x} x \right] \right] \quad (32)$$

Wyrażenie (32) przedstawia liczbę ziaren niemagnetycznych wyseparowanych do produktu niemagnetycznego na odcinku $0-x$.

Jeżeli założymy, że prędkość ruchu flokuły jest proporcjonalna do prędkości fali pola magnetycznego wzdłuż płyty separatora, wówczas $v_x = b\omega/k$, gdzie ω jest częstością kołową

zmian pola magnetycznego, k długością wektora falowego, zależną od konstrukcji separatora, b — stałą.

Uzysk składnika niemagnetycznego w produkcji niemagnetycznym jest równy:

$$(x) \frac{n(x)}{N_o} = 1 - \exp\left(-\frac{mg}{V_c(1-v)} \frac{v_z k}{b\omega} x\right) \quad (33)$$

W liczniku wykładnika potęgi wyrażenia (33) jest siła wykonująca pracę przeciw siłom wzajemnego oddziaływania ziaren, a więc siła sprzyjająca ich uporządkowaniu, natomiast w mianowniku znajduje się potencjał oddziaływań utrudniających to uporządkowanie. Tempo procesu uporządkowania będzie więc zależne od stosunku wielkości oddziaływań sprzyjających uporządkowaniu do wielkości oddziaływań przeciwdziałających temu procesowi. Chcąc poprawić efektywność separacji należy dążyć do zwiększenia tego stosunku.

Ze wzoru (33) stała prędkości separacji składnika niemagnetycznego wyraża się wzorem:

$$v = \frac{mg v_z k}{V_c(1-v)b\omega} \quad (34)$$

Następująca wielkość:

$$L = \frac{1}{n} \frac{bV_c\omega(1-v)}{mgv_z k} \quad (35)$$

nosi nazwę właściwej długości drogi separacji. Jest to taka długość drogi separacji, po której uzysk wyseparowanego składnika niemagnetycznego jest równy 0,63. W związku z tym zależność (33) można zapisać następująco:

$$(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \quad (36)$$

Ze wzoru (35) widać, że im większe są oddziaływania między ziarnami, tym ziarna niemagnetyczne trudniej opuszczają flokułę i tym większa musi być długość drogi separacji. Podobnie ze wzrostem częstości zmian pola okresy deflokulacji są krótsze i ziarna niemagnetyczne, ze względu na swoją bezwładność, opuszczają flokułę z opóźnieniem, co musi prowadzić do wzrostu długości drogi separacji.

Właściwa długość drogi separacji jest funkcją wielu zmiennych, a mianowicie: wielkości ziarn a , gęstości ziarn niemagnetycznych ρ_n , podatności magnetycznej ziarn niemagnetycznych κ_n , podatności magnetycznej ziarn magnetycznych κ_m , natężenia pola magnetycznego H , częstości zmian pola ω , właściwości powierzchniowych ziarn A oraz parametru konstrukcyjnego płyty separatora k . Można więc napisać ogólny wzór:

$$L = L(a, n, \kappa_n \kappa_m, \omega, A, k) \quad (37)$$

Chcąc podać jawną postać wzoru (37) należy do wzoru (35) wstawić w miejsce V_c formuły charakteryzujące oddziaływania między ziarnami.

Potencjał oddziaływań magnetycznych między ziarnami jest sumą trzech składników: potencjału oddziaływań ziarna niemagnetycznego z polem zewnętrznym V_H , potencjału oddziaływań ziarna magnetycznego i niemagnetycznego V_{m-n} oraz potencjału oddziaływań między ziarnami magnetycznymi V_m . Potencjał oddziaływań ziarna niemagnetycznego z polem zewnętrznym jest równy (Brożek 1996):

$$V_H = \frac{1}{12} \pi \kappa_n a^3 H^2 \quad (38)$$

gdzie κ_n oznacza podatność magnetyczną ziaren niemagnetycznych.

Potencjał oddziaływania ziarna niemagnetycznego z ziarnem magnetycznym wyraża się wzorem (Brożek 1999):

$$V_{m-n} = \frac{1}{16} \pi^2 \kappa_n \kappa_m a^3 H^2 \quad (39)$$

gdzie κ_m oznacza podatność magnetyczną ziaren magnetycznych.

Jeżeli między dwoma ziarnami magnetycznymi o średnicy d znajdzie się ziarno niemagnetyczne o tej samej wielkości, wówczas ziarno to będzie utrzymywane mechanicznie na skutek oddziaływań między ziarnami magnetycznymi. Potencjał tych oddziaływań jest równy (Brożek 1999):

$$V_m = \frac{1}{144} \pi^2 \kappa_m^2 a^3 H^2 \quad (40)$$

Siły oddziaływań ziarna niemagnetycznego z polem zewnętrznym oraz z ziarnami magnetycznymi utrudniają proces wyjścia ziaren niemagnetycznych ze strumienia głównego. Ich obecność wpływa na sprawność procesu separacji magnetycznej.

Separacja magnetyczna w separatorze płytowym jest prowadzona w stanie powietrzno-suchym wzbogacanego materiału. W związku z tym między ziarnami występują oddziaływania dyspersyjne Londona-Van der Waalsa wyrażone następującym wzorem (Overbeek 1984):

$$V_A = \frac{A_H a}{12h} \quad (41)$$

gdzie:

A_H — stała Hamakera,

h — odległość między oddziałującymi powierzchniami.

Po podstawieniu wymienionych wyżej oddziaływań do wzoru (35), uzyskuje się na właściwą długość drogi separacji następujące wyrażenie:

$$L = \frac{\frac{A_H}{12a^2 h} \frac{1}{18} \pi^2 \rho M_s^2 \frac{1}{2} \pi^2 \rho \kappa_n H M_s \frac{2}{3} \pi \rho \kappa_n H^2 \omega b(1 - \nu)}{\frac{3}{4} \pi \rho g v_z k} \quad (42)$$

Ze wzoru (42) wynika, że ze wzrostem natężenia pola magnetycznego oraz podatności magnetycznej ziaren magnetycznych i niemagnetycznych długość drogi separacji rośnie.

Długość drogi separacji zależy silnie od wielkości ziarna. Ze zmniejszaniem wielkości separowanych ziaren długość drogi separacji rośnie. Wynika to z faktu, że w przypadku ziaren skrajnie drobnych wzrasta udział oddziaływań powierzchniowych w ogólnym bilansie oddziaływań pomiędzy ziarnami.

3.2. Weryfikacja modelu rozdziału

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń zweryfikowano zależność właściwej drogi separacji od wielkości separowanych ziaren oraz wartości podatności magnetycznej ziarn niemagnetycznych. W tym celu przygotowano mieszanki magnetytu z piaskiem w kilku klasach ziarnowych o zawartości objętościowej magnetytu i piasku po 50% oraz dla zweryfikowania wpływu właściwości magnetycznych ziarn niemagnetycznych na drogę separacji — mieszanki dwóch frakcji ilmenitowych o różnych podatnościach magnetycznych z magnetytem o zawartości objętościowej magnetytu 50% i uziarnieniu 0,2—0,16 mm (Brożek 1999).

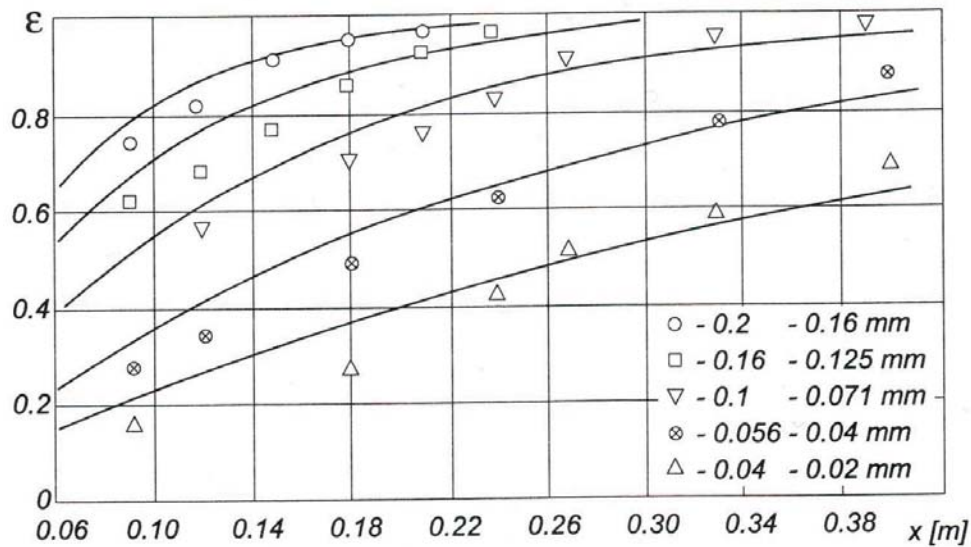
Próbki te rozseparowano w laboratoryjnym separatorze płytowym.

Na rysunku 3 podano zależność uzysku składnika niemagnetycznego (piasku) w produkcji niemagnetycznym od długości drogi separacji dla badanych klas ziarnowych. Po dopasowaniu zależności modelowej (42) do danych empirycznych wyliczono właściwą długość drogi separacji L .

Pomijając we wzorze (42) oddziaływania magnetyczne ziaren niemagnetycznych z ziarnami magnetycznymi i polem magnetycznym, zależność właściwej drogi separacji od wielkości ziaren jest następująca:

$$L(a) = c_1 \frac{c_2}{a} \quad (43)$$

gdzie c_1 i c_2 są stałymi równymi odpowiednio:



$$c_1 \frac{\pi \rho_m^2 H^2 \omega b (1 - \nu)}{2 n g v_z k}$$

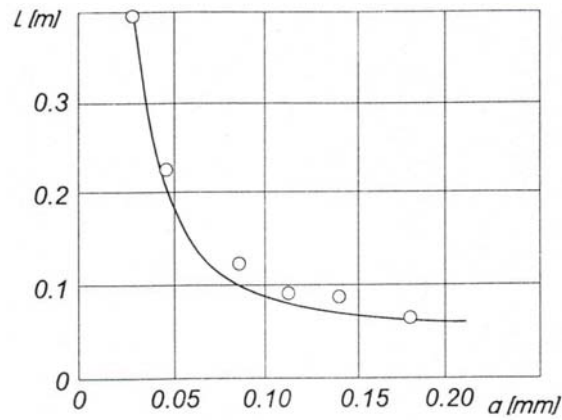
$$c_2 \frac{A \omega b (1 - \nu)}{1 \pi r n g v_z k}$$

Na rysunku 4 podana jest zależność właściwej drogi separacji od wielkości ziaren nadawcy. Linia ciągła przedstawia krzywą o następującym równaniu:

$$L(a) = 0,05 + \frac{0,00032}{a^2} \quad (44)$$

przy czym a wyrażone jest w milimetrach, natomiast L w metrach. Jak widać, właściwa długość drogi separacji gwałtownie rośnie dla ziaren poniżej 0,075 mm. Z tego względu separację na sucho przeprowadza się dla materiałów sypkich, pozbawionych ziaren najdrobniejszych.

Na rysunku 5 przedstawiono zależności doświadczalne i modelowe uzysku składnika niemagnetycznego w produkcji niemagnetycznym od długości drogi separacji dla dwóch



Rys. 4. Zależność długości właściwej drogi separacji od wielkości ziarna

Fig. 4. The dependence of the specific length of the separation path on the particle size

wartości podatności magnetycznej ziaren niemagnetycznych. Ze wzrostem podatności magnetycznej ziaren niemagnetycznych właściwa długość drogi separacji rośnie. Wynika to ze wzrostu wartości oddziaływań ziaren niemagnetycznych z ziarnami magnetycznymi oraz polem magnetycznym, co hamuje wyjście ziaren niemagnetycznych ze strumienia ziaren magnetycznych. Maleje również różnica między podatnością magnetyczną ziaren magnetycznych i niemagnetycznych, co utrudnia ich rozdział.

W pracy (Brożek 2002) podano wyrażenie na zawartość składnika magnetycznego w koncentracie. W przypadku separatora płytowego, z uwzględnieniem zależności (35) wyrażenie to ma postać:

$$m = \frac{1}{1 - \frac{n}{m} \exp \frac{x}{L}} \quad (45)$$

Jakość koncentratu jest zatem określona przez skład nadawy (α_n), długość drogi separacji x oraz długość właściwą drogi separacji L , a przez to od zmiennych obecnych we wzorze (42). Dla zależności $L(a)$ wyrażonej formułą (44) wzór na zawartość składnika magnetycznego w koncentracie w funkcji wielkości ziarna, przy długości drogi separacji $x = 0,1$ m oraz $\alpha_n = 0,5$, jest następujący:

$$m(a) = \frac{1}{1 - \exp \frac{a^2}{0,5a^2 - 0,0032}} \quad (46)$$

Powyższa zależność jest przedstawiona na rysunku 6. Obniżanie się zawartości składnika magnetycznego w koncentracie przy zmniejszaniu wielkości separowanych ziaren wynika ze wzrostu oddziaływań powierzchniowych Londona–Van der Waalsa. Dla ziaren większych, powyżej 0,2 mm, przy niezmiennym stopniu uwolnienia składnika magnetycznego w nadawie, nie obserwuje się wpływu oddziaływań powierzchniowych na wyniki separacji.

Uwagi końcowe

Przedstawiona w tej pracy analiza rozdziału oparta jest na heurystycznym modelu stałej prędkości separacji składnika niemagnetycznego ze strumienia magnetycznego. Model ten uwzględnia siły zewnętrzne działające na ziarno ze strony pola magnetycznego i grawitacyjnego oraz oddziaływania wewnętrzne pomiędzy ziarnami. Siłą zewnętrzną ułatwiającą wyjście ziaren niemagnetycznych ze strumienia ziaren magnetycznych jest siła ciężkości ziarna. Utrudniają ten proces oddziaływania magnetyczne i powierzchniowe pomiędzy ziarnami. Od stosunku tych dwóch sił — zewnętrznych i wewnętrznych — zależna jest prędkość i efektywność procesu rozdziału.

Podstawową zaletą heurystycznego podejścia do analizy procesu rozdziału jest możliwość uzależnienia wskaźników separacji od zmiennych mających istotny wpływ na proces poprzez zależności funkcyjne wyprowadzane z zasad pierwszych. W zależnościach tego typu nie ma stałych empirycznych nie mających interpretacji fizycznej.

Weryfikacja empiryczna wyprowadzonych z modelu zależności świadczy o poprawności przyjętych hipotez dotyczących przebiegu samego procesu rozdziału, jak i mechanizmu oddziaływań pomiędzy ziarnami. Gdyby z wyprowadzonych formuł wynikała jedynie zgodność jakościowa z danymi empirycznymi, a brak byłoby zgodności ilościowej — należałoby zweryfikować hipotezę dotyczącą przyjętych sił i oddziaływań pomiędzy ziarnami.

Praca napisana w ramach badań własnych. Nr umowy w AGH: 10.10.100.955

LITERATURA

- Brożek M., Pilch W., Kubicki T., Tumidański T., 1983 — Magnetic field distribution in the working space of a drum-plate separator. *Arch. Górnictwa* 28, 509—519.
- Brożek M., Pilch W., Polański W., Siwiec A., 1985 — A new type of drum-plate magnetic separator for dry fine ores processing. *Proc. XV IMPC, Cannes*, p. 435—445.
- Brożek M., 1996 — Analiza wzbogalności i wzbogacania surowców z uwzględnieniem ich właściwości fizycznych oraz oddziaływań między ziarnami. *Rozprawy Monografie nr 51, Wyd. AGH, Kraków*.
- Brożek M., 1999 — The physical model of magnetic separation in a plate separator. *Magnetic and Electrical Separation* 9, 149—167.
- Brożek M., 2002 — The distribution of magnetic fields and an analysis of the separation in process in a spiral separator. *Arch. Min. Sci.* 47, 139—156.
- Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M., 1974 — Feynmana wykłady z fizyki. PWN, Warszawa.
- Karaśkiewicz E., 1971 — *Zarys teorii wektorów i tensorów*. PWN, Warszawa.
- Mladeckij I.K., 1979 — Ocenka flokulacji silnomagnitnogo minerała v polach magnitnych separatorov. *Fizikotekhniceskije Problemy Razrabotki Poleznych Iskopajemych* no 6, 101—106.
- Overbeek J.Th.G., 1984 — Interparticle forces in colloidal science. *Powder Technology* 37, 195—208.
- Pilch W., Topolnicka B., 1972 — Separator elektromagnetyczny z podwójnym (wirującym) polem magnetycznym. *Zeszyty Naukowe AGH nr 381, Górnictwo* z. 39, 159—171.
- Pilch W., Sztaba K., Kotowski Cz., Kucha H., Nipl K., Ociepa Z., Siwiec A., 1975 — Investigations of magnetite titanium ore beneficiation. *Proc. XI IMPC, Cagliari*, p. 361—386.

- S v o b o d a J., 1987 — Magnetic methods for the treatment of minerals. Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo, Elsevier Sci. Publ.
- T o p o l n i c k a B., 1978a — Separator płytowy z ruchomym polem magnetycznym i jego zastosowanie do wzbogacania silnie magnetycznych rud. Zeszyty Naukowe AGH nr 589, 185—214.
- T o p o l n i c k a B., 1978b — Matematyczny model wzbogacania rud w magnetycznym separatorze płytowym z ruchomym polem magnetycznym. Zeszyty Naukowe AGH nr 589, 215—227.

MARIAN BROŻEK

THE ANALYSIS OF MAGNETIC SEPARATION IN PLATE SEPARATORS

Key words

Plate separator, alternating magnetic field, magnetic field distribution, heuristic model, dry separation

Abstract

Magnetic dry enrichment of fine raw materials is accompanied by the phenomenon of magnetic flocculation the intensity of which depends on magnetic properties of the separated mixture. The separation in the alternating magnetic field is applied to reduce this phenomenon. Such a field is generated in plate separators with a moving magnetic field.

The paper analyses the separation in plate separators, based on the heuristic model of separation. Applying the solution of Maxwell's equations the author determined the distribution of magnetic field and magnetic force, acting on the particle in the separator working zone. Starting from the equation of balance of all forces acting upon the particle the author derived the dependence of recovery and content of the magnetic component in the magnetic product on the factors affecting the process, such as particle size, density of magnetic particles, magnetic susceptibility of magnetic and non-magnetic particles, magnetic field intensity, frequency of field alterations, surface properties of particles and length of separation path. The derived formulas verified the dependence of recovery upon the length of separation path and magnetic properties of the non-magnetic component as well as the dependence of the content of the magnetic component in the magnetic product on particle size, obtaining good compatibility with the experiment.