

Władysław PILCH*

Antoni SIWIEC*

TRAN QUANG Bang*

TEORETYCZNE I TECHNOLOGICZNE UWARUNKOWANIA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWAŃ SEPARATORÓW ZE ZMIENNYM POLEM MAGNETYCZNYM DO WZBOGACANIA SKRAJNIE DROBNYCH MATERIAŁÓW

W referacie omówiono możliwości zastosowań separatorów ze zmiennym polem magnetycznym w czasie i przestrzeni. Omówiono siły magnetyczne działające na ziarna w przestrzeniach tych separatorów i możliwości ich zastosowań. Główną zaletą separatorów badanego typu jest możliwość ich zastosowania do wzbogacania na sucho dla skrajnie drobnych materiałów zawierających składniki o właściwościach ferromagnetycznych jak np. pyły dymiczne zawierające magnetyt.

1. Wprowadzenie

Separatory ze zmiennym polem magnetycznym znajdują dotychczas zastosowanie do wzbogacania wyłącznie na sucho drobnych bądź skrajnie drobnych materiałów stosunkowo silnie magnetycznych. Najstarsze urządzenie tego typu stanowią separatory Laurilla, których schemat jest przedstawiony na rys.1. Składa się on z wirującego bębna i umieszczonego wewnątrz układu magnesów trwałych również wirujących. Nadawa jest podawana na bęben. Ziarna niemagnetyczne siłą odśrodkową odpadają od bębna, natomiast ziarna magnetyczne odprowadzane są od bębna za pomocą wałka indukcyjnego.

Rys.1: Schemat separatora typu Laurilla :

1-bęben obrotowy, 2-wirujący układ biegunów magnesów trwałych, 3-walek indukcyjny, M-produkt magnetyczny, N-produkt niemagnetyczny.

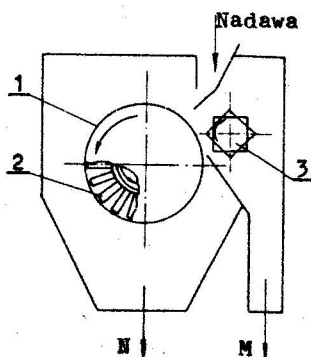


Fig.1: Scheme of Laurilla type separator:

1-rotating drum, 2-rotating permanent magnets, 3-induce roll, M-magnetic product, N-nonmagnetic product.

Intensywne prace badawcze prowadzone w ostatnich latach doprowadziły do powstania kilku nowych tego typu separatorów, których ogólna cecha charakteryzuje się tym, iż zmienne pole magnetyczne wytwarzane jest przez prąd zmienny : przemienny lub trójfazowy. Wśród tych separatorów można wymienić: separator z mieszanym polem magnetycznym proponowany przez R. Krukiewicza [4,6], (rys.2) ; separator płytowy, w którym pole magnetyczne jest wytwarzane przez prąd trójfazowy [14,15], (rys.3) ; separator kołowy, w którym pole magnetyczne jest wytwarzane w identyczny sposób tak jak w silnikach trójfazowych. Można by skonstruować separator, w którym elektromagnesy byłyby zasilane prądem przemiennym [9].

Rys.2: Bęben separatora z mieszanym polem magnetycznym [6]:

1-bęben, 2-magnesy trwałe, 3-elektromagnesy, 4-uzwojenie elektromagnesu, 5-oś bębna, 6-korpus mocujący, 7-śruba kontruująca.

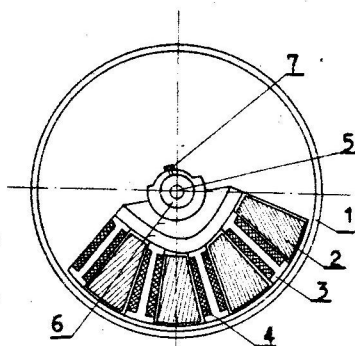


Fig.2: Separator with two kinds of magnetic field 6 :

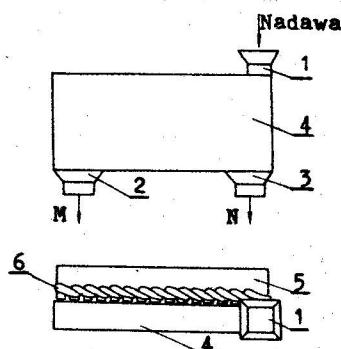
1-drum, 2-permanent magnets, 3-electromagnets, 4-coils, 5-axle of drum, 6-construction, 7-control screw.

Główną zaletą separatorów ze zmiennym polem magnetycznym jest możliwość uzyskania produktów o bardzo wysokiej czystości [1,2,3,4,7,14,15]. Przyczyna tego efektu tkwi przede wszystkim w tym, iż w zmiennych polach magnetycznych zachodzi dość intensywnie proces deflokulacji magnetycznej, co powoduje uwalnianie ziarn niemagnetycznych uwięzionych we flocu-

łach [7,8,9,10,11,12,13,14,15].

Rys.3: Schemat separatora płytowego: 1-podajnik nadawy, 2-odbiornik produktu magnetycznego, 3-odbiornik produktu niemagnetycznego, 4-komora robocza, 5-płyta, 6-uzwojenie trójfazowe.

Fig.3: Scheme of plate separator: 1-feeder, 2-tank for magnetic product, 3-tank for nonmagnetic product, 4-working space, 5-plate, 6-threephase coils.



2. Rozkład pola i sił w przestrzeniach roboczych separatorów ze zmiennym polem magnetycznym

Ze względu na charakter pola magnetycznego separatorów ze zmiennym polem magnetycznym można podzielić na następujące grupy :

- separatorów z mieszanym polem, w których pole wypadkowe jest superpozycją dwóch pól: stałego i przemiennego,
- separatorów z przemennym polem, w których pole magnetyczne jest wytwarzane tylko przez elektromagnesy zasilane prądem przemennym,
- separatorów z ruchomym polem, w których pole magnetyczne jest wytwarzane przez prąd trójfazowy lub wirujący układ magnesów trwałych, mamy w tym przypadku do czynienia z biegnącym lub wirującym polem magnetycznym.

Siła magnetyczna działająca na jednostkę objętości ziarn magnetycznych określona jest równaniem:

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 \chi \text{grad } \vec{H}^2 \quad (1)$$

gdzie:

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m,

χ - podatność magnetyczna ziarna, bezwymiarowa,

H - natężenie pola magnetycznego w tym punkcie, w którym znajduje się dane ziarno magnetyczne.

Z powyższego wzoru wynika, że dla wyznaczenia rozkładu siły magnetycznej w przestrzeniach roboczych separatorów należy najpierw wyznaczyć rozkład natężenia pola H . W przestrzeniach roboczych separatorów badanego typu nie ma prądów elektrycznych, tzn. $I = 0$, równania Maxwella dla pola magnetycznego przyjmują postać [14,15]:

$$\text{rot } \vec{H} = 0 \quad (2)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (3)$$

gdzie $\vec{H}$ i $\vec{B}$ oznaczają wektory natężenia i indukcji pola magnetycznego.

Z równania (2) wynika, że pole jest bezwirowe, można więc wprowadzić pojęcie skalarnego potencjału magnetycznego V , który jest określony w każdym punkcie badanego obszaru, a natężenie $\vec{H}$ pola magnetycznego wyznacza się wzorem:

$$\vec{H} = - \text{grad } V \quad (4)$$

W wyznaczeniu rozkładu siły magnetycznej w przestrzeniach roboczych separatorów ze zmiennym polem magnetycznym należy więc najpierw wyznaczyć rozkład skalarnego potencjału V , następnie rozkład natężenia pola $\vec{H}$ według wzoru (4), a ostatecznie rozkład siły magnetycznej wyznacza się na podstawie wzoru (1). Przebieg ten przedstawiono szczegółowo w pracach [9,11,13,15], a rozkład sił magnetycznych w przestrzeni roboczej poszczególnych grup separatorów badanego typu jest następujący:

2.1. Rozkład sił magnetycznych w separatorze z mieszanym polem magnetycznym [13]

$$\begin{aligned} \vec{F}_m(x,y,t) &= \vec{F}_{ms}(x,y) + \vec{F}_{mz}(x,y,t) \\ &= -\frac{1}{2} \mu_0 \chi k e^{-2ky} \left[H_{ms}^2 \sin^2 kx + H_{mz}^2 \sin^2 \omega t \cdot \sin^2 k \left(x - \frac{\tau}{2} \right) \right] \cdot \vec{I} + \\ &\quad - \mu_0 \chi k e^{-2ky} \left[H_{ms}^2 \cos^2 kx + H_{mz}^2 \sin^2 \omega t \cdot \cos^2 k \left(x - \frac{\tau}{2} \right) \right] \cdot \vec{J} \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:

$f_m(x,y,t)$ - wypadkowa siła magnetyczna w danym położeniu (x,y) w danej chwili t ,

$f_{ms}(x,y)$ - siła magnetyczna wywoływana układem biegunów magnesów trwałych,

$f_{mz}(x,y,t)$ - siła magnetyczna wywoływana układem elektromagnesów zasilanych prądem przemiennym,

$$k = \frac{\pi}{\tau}$$

τ - podziałka biegunowa,

ω - pulsacja prądu zasilania elektromagnesów,

$\vec{I}$ i $\vec{J}$ - wektory jednostkowe.

Rozkład sił magnetycznych na podstawie wzoru (5) przedstawiono graficznie na rys.4.

2.2. Rozkład sił magnetycznych w separatorze z przemiennym polem magnetycznym [9]

$$\begin{aligned} \vec{F}_m(x,y,t) &= \vec{F}_{mx}(x,y,t) + \vec{F}_{my}(x,y,t) \\ &= -\frac{1}{2} \mu_0 \chi H_{\max}^2 e^{-2ky} \sin^2 \omega t \cdot \sin^2 kx \cdot \vec{I} + \end{aligned}$$

$$- \mu_0 k \chi H_{\max}^2 e^{-2ky} \sin^2 \omega t \cdot \cos^2 kx. \quad (6)$$

gdzie:

$f_m(x,y,t)$ - siła magnetyczna działająca na ziarno w położeniu (x,y) w danej chwili t ,

$f_{mx}(x,y,t)$ - składowa siły magnetycznej w kierunku osi Ox ,

$f_{my}(x,y,t)$ - składowa w kierunku osi Oy ,

$H_{\max}$ - maksymalna wartość (amplituda) natężenia pola magnetycznego nad poszczególnym biegunem elektromagnesu na powierzchni nabiegunnikowej.

Rozkład siły magnetycznej w separatorze z przemiennym polem na podstawie powyższego wzoru przedstawiono na rys.5.

Rys.4: Rozkład sił magnetycznych w separatorze z mieszanym polem:

4.1: Schemat separatora wraz z układem współrzędnych: 1-magnes trwały, 2-elektromagnesy.

4.2: Rozkład sił magnetycznych:

a) w czasie $t = n \frac{\pi}{\omega}$

b) w czasie $t \in \left[n \frac{\pi}{\omega} \div (n+1) \frac{\pi}{\omega} \right]$

c) w czasie $t = (2n+1) \frac{\pi}{2\omega}$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

1, 1' - składowe siły f_{ms} na osi Ox i Oy ,

2, 2' - składowe siły f_{mz} na osi Ox i Oy ,

3, 3' - składowe wypadkowej siły f_m na osi Ox i Oy .

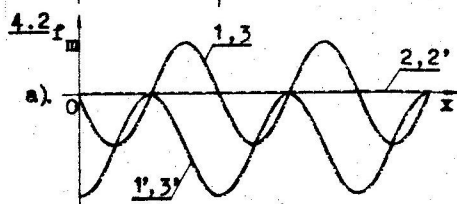
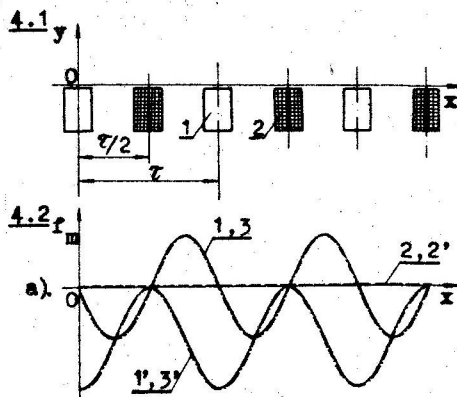


Fig.4: Distribution of magnetic forces in a separator with two kinds of magnetic fields:

4.1: Scheme of separator with coordinate system: 1-permanent magnets, 2-electromagnets.

4.2: Distribution of magnetic forces:

a) as a function of time

$$t = n \frac{\pi}{\omega}$$

b) as a function of time

$$t \in \left[n \frac{\pi}{\omega} \div (n+1) \frac{\pi}{\omega} \right]$$

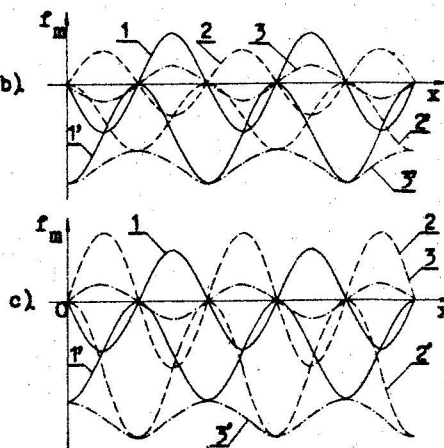
c) as a function of time

$$t = (2n+1) \frac{\pi}{2\omega}, \quad n=0, 1, 2, 3, \dots$$

1, 1' - components of magnetic force f_{ms} in direction of Ox and Oy axis,

2, 2' - components of magnetic force f_{mz} in direction of Ox and Oy axis,

3, 3' - components of total magnetic force f_m in direction of Ox and Oy axis.



Rys.5: Rozkład siły magnetycznej w separatorze z przemiennym polem:

5.1: Schemat separatora wraz z układem współrzędnych.

5.2: Rozkład siły magnetycznej:

- a) $t = \frac{n\pi}{\omega}$; b) $t = \frac{2n+1}{\omega} \frac{\pi}{4}$
 c) $t = \frac{2n+1}{\omega} \frac{\pi}{2}$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Fig.5: Distribution of magnetic force in the separator with alternating magnetic field:

5.1: Scheme of the separator with the coordinate system.

5.2: Distribution of magnetic force:

a) as a function of time

$$t = \frac{n\pi}{\omega}$$

b) as a function of time

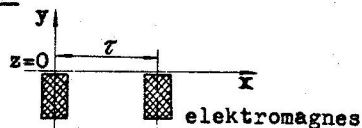
$$t = \frac{2n+1}{\omega} \frac{\pi}{4}$$

c) as a function of time

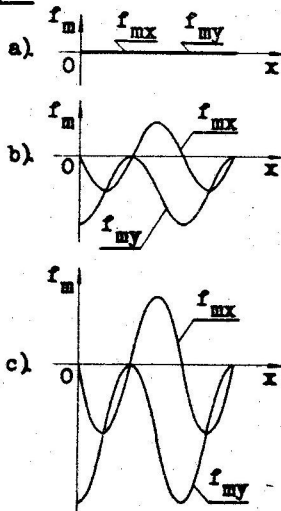
$$t = \frac{2n+1}{\omega} \frac{\pi}{2}$$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

5.1



5.2



2.3. Rozkład siły magnetycznej w separatorach z ruchomym polem magnetycznym [11,15]

$$\begin{aligned} \vec{F}_m(x, y, t) &= \vec{F}_{mx}(x, y, t) + \vec{F}_{my}(x, y, t) \\ &= \frac{1}{2} \mu_0 k \chi H_m^2 e^{-2ky} \sin 2k(x - v_p t) \cdot \vec{i} + \\ &\quad - \mu_0 k \chi H_m^2 e^{-2ky} \sin^2 k(x - v_p t) \cdot \vec{j} \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:

$f_m(x, y, t)$ - siła magnetyczna działająca na ziarno w danym położeniu (x, y) w danej chwili t ,

$f_{mx}(x, y, t)$ - składowa siły magnetycznej w kierunku osi Ox ,

$f_{my}(x, y, t)$ - składowa w kierunku osi Oy ,

H_m - podobnie jak H_{max} we wzorze (6),

v_p - prędkość pola magnetycznego separatora (wzdłuż kierunku osi Ox).

Rozkład siły magnetycznej w separatorach z ruchomym polem magnetycznym według wzoru (7) przedstawiono na rys.6. Podobnie jak w poprzednich przypadkach, w tych separatorach składowa f_{my} siły magnetycznej jest

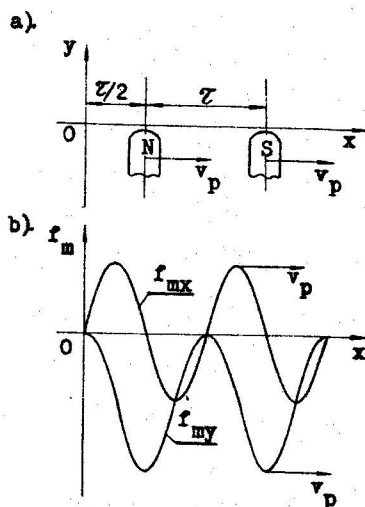
również zawsze skierowana ku powierzchni nabiegunnikowej.

Rys.6: Rozkład siły magnetycznej w separatorze z ruchomym polem:

- a) schemat separatora wraz u układem współrzędnych,
- b) rozkład siły magnetycznej.

Fig.6: Distribution of magnetic force of the separator with the rotating magnetic field:

- a) scheme of the separator with the coordinate system,
- b) distribution of magnetic force.

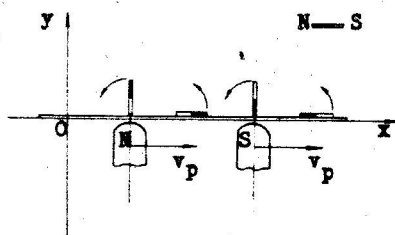


3. Efektywność wzbogacania w separatorach ze zmiennym polem magnetycznym

We wzbogacaniu drobnych, a zwłaszcza skrajnie drobnych materiałów zawierających składniki o własnościach ferromagnetycznych istnieje duża trudność w uzyskiwaniu końcowych produktów o wysokiej czystości. Zanieczyszczenie produktu magnetycznego ziarnami niemagnetycznymi spowodowane jest głównie flokulacją magnetyczną, polegającą się na łączeniu się ziarn magnetycznych w większe agregaty, wśród których mogą być uwięzione ziarna niemagnetyczne i razem trafiają one do produktu magnetycznego. Proces flokulacji magnetycznej zachodzi tym silniej, im mniejsze będzie uziarnienie wzbogacanego materiału. Proces deflokulacji magnetycznej w separatorach ze zmiennym polem wynika z dwóch przyczyn: po pierwsze ziarno magnetyczne cały czas jest pod wpływem działania zmiennych sił magnetycznych (wzór (5,6,7)); po drugie ziarno magnetyczne może zachowywać się jak trwały magnes [12,15], a pod działaniem zmiennego pola magnetycznego może wykonywać ruch obrotowy dla osiągnięcia zgodności kierunku własnego pola (indukowanego) z kierunkiem pola zewnętrznego (separatora), taki ruch niewątpliwie sprzyja rozbiciu floków magnetycznych wytwarzając możliwość uwolnienia ziarn niemagnetycznych w trakcie separacji. Ziarno może zachowywać się tak jak trwały magnes w zewnętrznym polu magnetycznym tylko wówczas, kiedy ma wystarczającą pozostałość magnetyczną oraz znaczną bezwładność namagnesowania. Drugą przyczyną wynika więc z pozostałości magnetycznej i bezwładności namagnesowania wzbogaca-

nego materiału.

Ze wzorów (5,6,7) widać, iż w przestrzeniach roboczych separatorów badanego typu ziarna magnetyczne są cały czas pod działaniem zmiennych zarówno w przestrzeni jak i w czasie sił magnetycznych. We wszystkich przypadkach składowa siły w kierunku osi Oy skierowana jest zawsze ku powierzchni nabiegunnikowej separatorów. Ziarna wzbogacanego materiału o dużej pozostałości magnetycznej i bezwładności namagnesowania w trakcie separacji zachowują się identycznie jak trwałe magnesy. Flokuły magnetyczne utworzone w przestrzeni roboczej mogą oczywiście zachowywać się także w podobny sposób. Wynika z tego, że pod wpływem wymienionego zjawiska ziarna i flokuły magnetyczne muszą wykonywać ruch obrotowy dla osiągnięcia zgodności kierunku swego pola magnetycznego z kierunkiem pola zewnętrznego, co wytwarza możliwość uwolnienia ziarn niemagnetycznych uwięzionych we flokułach. Efektywność procesu deflokulacji magnetycznej zależy więc od liczby obrotów ziarn i flokuł, tzn. od zmienności pola magnetycznego separatora. W separatorach z przemiennym polem i z mieszanym polem magnetycznym proces deflokulacji zachodzi przede wszystkim w trakcie dojścia ziarn i flokuł do powierzchni nabiegunnikowej. W separatorach z ruchomym polem natomiast proces ten zachodzi w obydwu fazach zarówno w trakcie dojścia ziarn i flokuł do powierzchni nabiegunnikowej jak i po niej. Zjawisko to ilustrowano na rys.7. W tych separatorach



Rys.7: Ilustracja ruchu ziarn magnetycznych po powierzchni nabiegunnikowej separatorów z ruchomym polem magnetycznym.

Fig.7: Picture of a motion of magnetic particles on a magnetic pole surface of a separator with rotating field.

flokuły magnetyczne poruszają się w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu pola magnetycznego separatora (po powierzchni nabiegunnikowej). W taki sposób flokuły wykonują liczne zderzenia między sobą i z powierzchnią nabiegunnikową separatora wytwarzając dużą możliwość uwolnienia ziarn niemagnetycznych, a więc tym samym możliwość uzyskiwania produktu magnetycznego o wysokiej czystości.

4. Uwagi końcowe

Z powyższych rozważań wynika, że separatory ze zmiennym polem magnetycznym mogą być zastosowane do wzbogacania na sucho nawet skrajnie drobnych materiałów ze względu na swoją zdolność do deflokulacji wzbogacanego materiału w trakcie separacji. Z mechanizmu procesu deflokulacji magnetycznej w separatorach badanego typu opisanego wyżej wynika jednak pewne ograniczenie ich zastosowań, gdyż odnosi to tylko do minerałów o dużej pozostałości magnetycznej i bezwładności namagnesowania, tj. do minerałów stosunkowo silnie magnetycznych. W szeregu przypadków są one niezastąpionymi urządzeniami gdy proces separacji trzeba prowadzić na sucho, np. separacja pyłów dymicznych, w pewnych przypadkach - do oczyszczenia proszków metalurgicznych. Ujemną stroną tych separatorów, a zwłaszcza tych, gdzie pole magnetyczne generowane jest za pośrednictwem trójfazowego prądu przemiennego jest wysoka energochłonność i dość niska wydajność.

Literatura

1. Karmazin W.I.: Sowremennyye metody magnitnogo obogaszcheniya rud czernych metallow. Niedra, Moskwa 1962.
2. Karmazin W.I. i in.: Teoria i praktika separacji w elektricheskom i magnitnom poliach. Nauka, Moskwa 1972.
3. Karmazin B.B. i in.: Magnitnye metody obogaszcheniya. Niedra, Moskwa 1984.
4. Krukiewicz R.: Zwiększanie efektywności wzbogacania na separatorach magnetycznych przez zastosowanie zmiennego i stałego pola magnetycznego. XVII Krakowska Konferencja Naukowo-Techniczna Przeróbki Kopalin. Kraków - Zakopane 1983.
5. Lomowcew L.A. i in.: Magnitnye obogaszcheniya silnomagnitnykh rud. Niedra, Moskwa 1979.
6. Krukiewicz R.: Bęben separatora magnetycznego. Patent nr 132994 PRL.
7. Pilch W., Siwiec A., Polański W.: Urządzenie do separacji magnetycznej materiałów sypkich. Patent nr 130614 PRL.
8. Pilch W., Topolnicka B.: Separator elektromagnetyczny z podwójnym ruchomym (wirującym) polem magnetycznym. Zeszyt naukowy AGH nr 381, Kraków 1972.
9. Siwiec A., Tran Quang Bang : Rozkład pola i sił w przestrzeni roboczej separatora o zmiennym polu magnetycznym. Kwartalnik "Górnictwo" nr 1/1988. AGH - Kraków.
10. Siwiec A., Tran Quang Bang : Ruch ziarn magnetycznych w przestrzeni roboczej separatora pływowego. Kwartalnik "Górnictwo" nr 2/1988. AGH - Kraków.

11. Siwiec A., Brożek M., Tran Quang Bang : Field and Magnetic Force Distribution of Plate Separation Based on the Mechanical Model. Archiwum Górnictwa nr 2/1988.
12. Siwiec A., Tran Quang Bang : Kinytyka ruchu ziarn magnetycznych w przestrzeni roboczej separatora z ruchomym polem magnetycznym. Archiwum Górnictwa (w druku).
13. Pilch W., Siwiec A., Tran Quang Bang : Rozkład pola i sił w separatorze z mieszanym polem magnetycznym. Kwartalnik "Górnictwo" AGH, Kraków (w druku).
14. Topolnicka B.: Badania nad wykorzystaniem zmiennego pola magnetycznego do wzbogacania niektórych minerałów magnetycznych. Praca doktorska. AGH - Kraków 1975.
15. Tran Quang Bang: Zastosowanie ruchomych pól magnetycznych do wzbogacania silniemagnetycznych surowców mineralnych. Praca doktorska. AGH, Kraków 1988.

Abstract

Pilch W., Siwiec A., Tran Qan Bang., Theoretical and practical conditions for application of magnetic separators with moving field for beneficiation of fine particles., Physicochemical Problems of Mineral Processing., 21; 55-64 (polish text)

The magnetic separators with alternating magnetic field and their applications have been discussed. Moreover, magnetic forces acting on the magnetic particles in the working space of these separators and distribution of magnetic field has been interviewed. The main advantage of such separators is the possibility of their application for dry separation of very fine disseminated materials, e.g for beneficiation of fly ashes containing magnetics and others materials.

СОДЕРЖАНИЕ

В.Пильх, А.Сивец, Тран Куанг Банг, 1989. Теоретическая и технологическая обусловленность возможности применения сепараторов с переменным магнитным полем для обогащения крайне мелких материалов. Физикохимические вопросы обогащения, 21; 55-64.

В докладе рассмотрена возможность применения сепараторов с переменным магнитным полем во времени и пространстве. Рассмотрены магнитные силы, действующие на зерна в пространствах этих сепараторов и возможность их применения. Главным преимуществом этих сепараторов является возможность их применения для сухого обогащения крайне мелких материалов, содержащих компоненты с ферромагнитными свойствами такие, как например, дымовая пыль, содержащая магнит.