

Antoni CIEŚLA

DYNAMICZNE DZIAŁANIE PÓL: ELEKTRYCZNEGO I MAGNETYCZNEGO W ELEKTROTECHNOLOGIACH (NA PRZYKŁADZIE SEPARACJI)^{*)}

STRESZCZENIE *Statyczne pola elektryczne i magnetyczne są wykorzystywane m. in. w procesach technologicznych takich jak separacja elektryczna i magnetyczna. Separacja jest procesem rozdzielania dwóch lub większej ilości faz stałych, zróżnicowanych pod względem właściwości fizycznych, siłami pola: elektrycznego (separacja elektryczna), lub magnetycznego (separacja magnetyczna). Przedstawiono działanie wysokonapięciowego separatora bębnowego i wysokogradientowego separatora magnetycznego oraz model dynamicznego działania pól: elektrycznego i magnetycznego w opisanych procesach separacji. Dokonano analizy rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego w przestrzeniach roboczych separatorów oraz sił działających na cząstki dielektryków i paramagnetyków, przedstawiono także tory cząstek w obu typach separatorów.*

Słowa kluczowe: *pole elektrostatyczne, pole magnetostatyczne, separacja elektryczna, separacja magnetyczna, separator bębnowy, separator magnetyczny*

^{*)} Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy nr 4 T12A 027 28

dr hab. inż. Antoni CIEŚLA, prof. n. AGH
e-mail: aciesla@uci.agh.edu.pl

Katedra Elektrotechniki
Akademia Górniczo-Hutnicza
al. Mickiewicza 30,
30-059 KRAKÓW, POLSKA

1. WPROWADZENIE

Separatory to urządzenia, w których następuje proces rozdziału ziaren ze względu na ich różnice we właściwościach fizycznych. Mechanizm rozdziału tych ziaren w komorze separatora można opisać następującymi równaniami kinetyki [1]:

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = \beta C(x, t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = \beta C(x, t) \left[1 - \frac{P(x, t)}{A} \right] \quad (2)$$

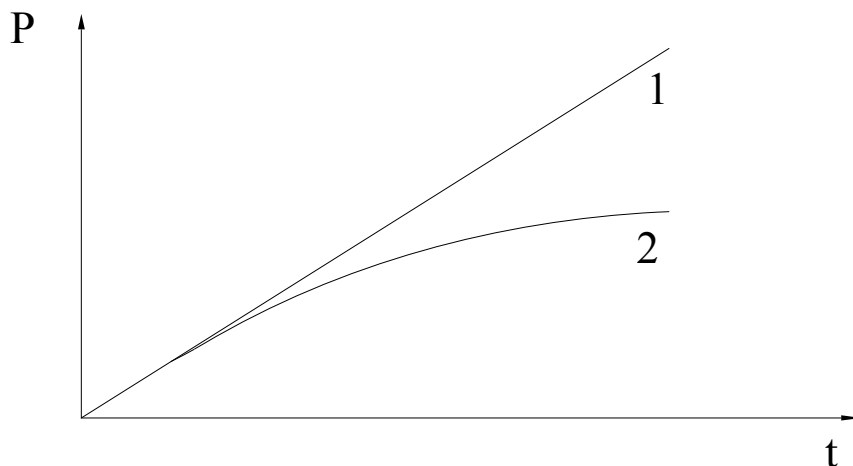
w których:

- $P(x, t)$ [kgm^{-3}] – koncentracja ziaren wydzielonych w separatorze,
- $C(x, t)$ [kgm^{-3}] – koncentracja ziaren przepływających przez separator,
- A [kgm^{-3}] – maksymalna wartość P ($A = P(x, t)_{\max}$),
- β [-] – współczynnik aktywności procesu ekstrakcji ziaren w separatorze.

Użyty w równaniach (1) i (2) współczynnik aktywności β ujmuje – z punktu widzenia rozważań teoretycznych i zastosowań technicznych – całość działania różnych mechanizmów na proces ekstrakcji ziaren. Charakteryzuje on prawdopodobieństwo wydzielania ziaren z przepływającej przez separator strugi z zawiesiny w ośrodku porowatym. Zależności opisane równaniami (1) i (2) są graficznie przedstawione na rys. 1.

Równanie (1) opisuje przebieg zjawiska wydzielania ziaren, uzależniając go jedynie od ich koncentracji w strudze. Według tego równania pochodna funkcji $P(x, t)$ względem czasu jest stała w całym okresie przebiegu zjawiska. Taki przebieg separacji zachodzi jedynie przy małych wartościach $P(x, t)$. Zgodnie z tą kinetyką pracują np. elektrofiltry, separatory elektryczne oraz ośrodki porowate z wymianą wkładu. Urządzenie takie nie posiadają więc granicznej wartości wysycania.

Równanie (2) opisuje takie przebiegi zjawiska rozdziału ziaren, w których nie zachodzi ich odprowadzanie na zewnątrz separatora. W obszarze separatora gromadzi się więc cała zatrzymywana masa ziaren. Ilustracją równania (2) jest krzywa 2 na rys. 1.



Rys. 1. Krzywe ilustrujące typy kinetyki ekstrakcji cząstek dane równaniem (1) – krzywa 1 i równaniem (2) – krzywa 2

Oprócz równań kinetyki, przy analizie przepływu strugi ziaren przez separator, należy uwzględnić także równanie bilansu. Równanie to, z uwzględnieniem lokalnych zmian funkcji $C(x,t)$ ma następującą postać [1]:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} + v_0 \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

gdzie:

v_0 [ms^{-1}] – prędkość przepływu zawiesiny przez matrycę.

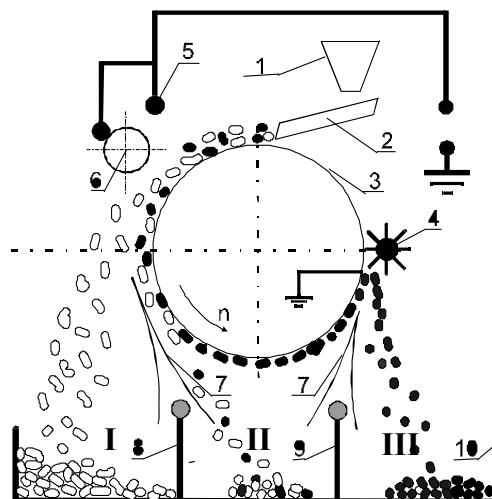
Przy pomocy równań (1), (2) i (3) można opisać procesy zachodzące w strefie rozdziału różnych typów separatorów.

Przykładem urządzenia działającego wg kinetyki opisanej równaniem (1) jest elektrodynamiczny separator bębnowy, którego schemat przedstawia rys. 2. Opis działania separatora znaleźć można m.in. w [2].

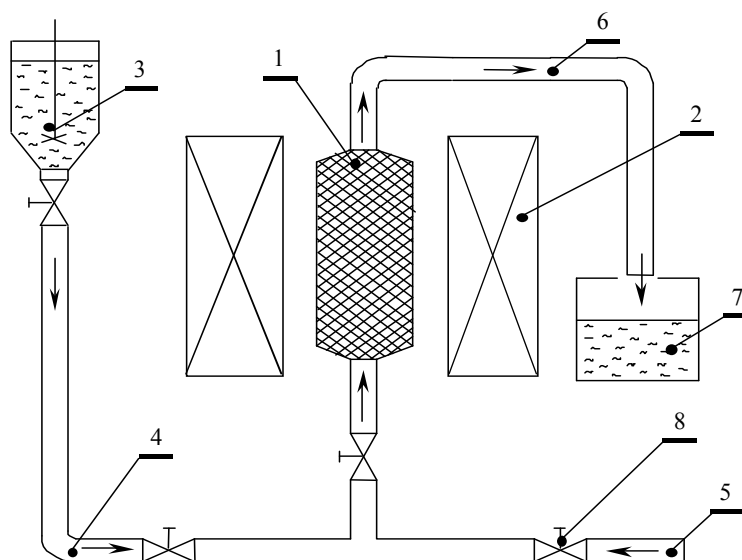
Rys. 2. Schemat elektrodynamicznego separatora bębnowego:

Oznaczenia:

1 – zbiornik nadawy, 2 – podajnik nadawy, 3 – bęben, 4 – szczotka, 5 – elektroda ulotowa, 6 – elektroda odchylająca, 7 – przegrody, I, II, III – zbiorniki produktów separacji



Według kinetyki opisanej wzorem (2) działa np. magnetyczny separator wysokogradientowy (rys. 3). Zasada działania przedstawiona jest w [1].



Rys. 3. Wysokogradientowy separator magnetyczny:

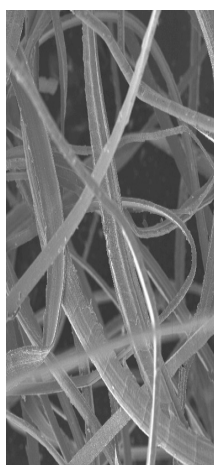
Oznaczenia:

1 – matryca separatora, 2 – uzwojenie elektromagnesu nadprzewodnikowego, 3 – zbiornik zawiesiny poddawanej separacji, 4 – strumień zawiesiny, 5 – strumień wody czyszczącej, 6 – strumień produktu separacji, 7 – zbiornik produktu separacji, 8 – zawór

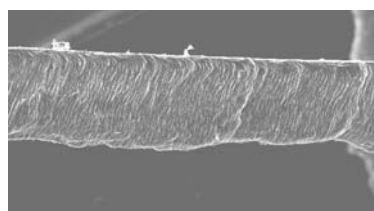
a)



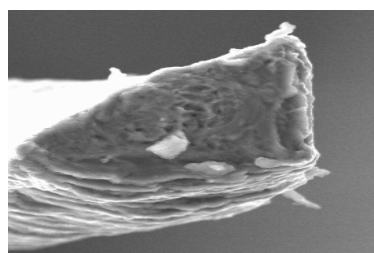
b)



c)



d)



Rys. 4. Matryca separatora wysokogradientowego (a) i jej wypełnienie watą ferromagnetyczną (b); powiększenie włókna waty (c); przekrój włókna (d)

2. ELEKTRODYNAMICZNY SEPARATOR BĘBNOWY

2.1. Podstawy fizyczne separacji elektrycznej

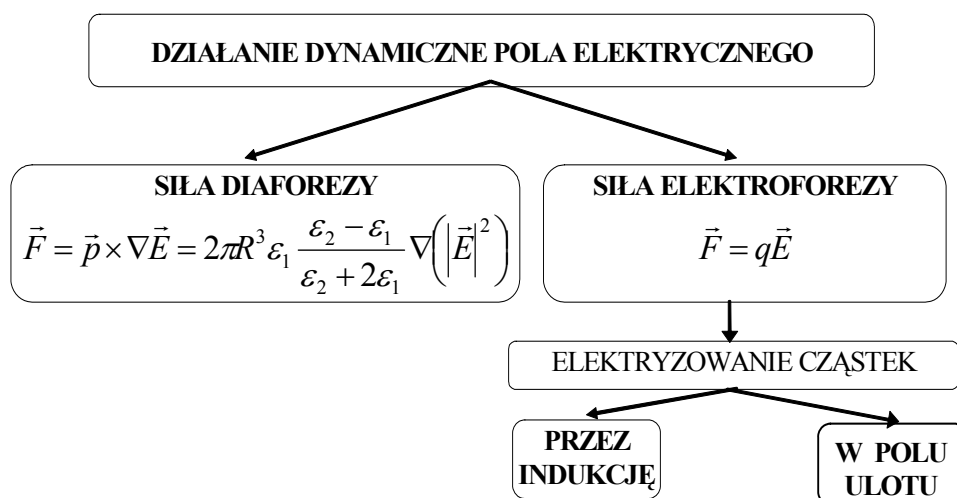
Cząstki dielektryka umieszczone w polu elektrycznym, podlegają oddziaływaniu tego pola zgodnie z zależnością:

$$\vec{F}_e = \vec{p} \times \nabla \vec{E} + q\vec{E} \quad (4)$$

gdzie:

- \vec{F}_e [N] – siła oddziaływania pola elektrycznego,
- \vec{p} [Cm] – moment elektryczny cząstek,
- \vec{E} [Vm⁻¹] – natężenie pola elektrycznego,
- q [C] – ładunek elektryczny cząstek.

Pierwszy składnik równania (4) określa siłę diaforezy pojawiającą się tylko w polach niejednorodnych zaś drugi składnik tego równania – siłę elektroforezy działającą na naelektryzowaną uprzednio cząstkę. Na rysunku 5 przedstawiono schematycznie sposoby oddziaływania pola elektrycznego na cząstki dielektryka i podstawowe metody ich elektryzowania. Proces elektryzowania ziarna znajdującego się na bębnie separatora (rys. 2) autor przedstawił w [2].



Rys. 5. Schemat możliwych oddziaływań dynamicznych pola elektrycznego

2.2. Rozkład pola elektrycznego w separatorze bębnowym

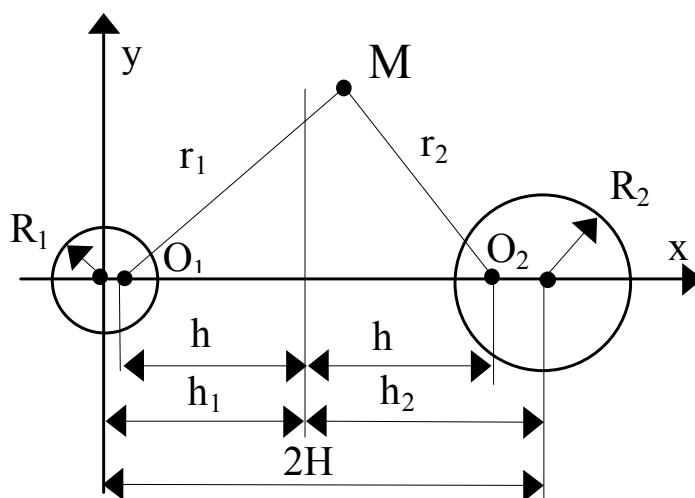
Cząstka o określonym ładunku porusza się w polu elektrycznym wytworzonym przez dwa walce (rys. 6). Potencjał pola elektrycznego w punkcie M na zewnątrz walców wyraża się wzorem [3]:

$$V_M = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (5)$$

gdzie :

r_1, r_2 [m] – są odległościami punktu M od biegunów O_1, O_2 i wynoszą:

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(a - h_1 + x)^2 + y^2} \\ r_2 &= \sqrt{(h_1 + a - x)^2 + y^2} \end{aligned} \quad (6)$$



Rys. 6. Szkic do wyznaczenia rozkładu pola między dwoma walcami [3]

Składowe pola elektrycznego w punkcie M:

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{\partial V_M}{\partial x} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{a - h_1 + x}{(a - h_1 + x)^2 + y^2} + \frac{h_1 + a - x}{(h_1 + a - x)^2 + y^2} \right] \\ E_y &= -\frac{\partial V_M}{\partial y} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{y}{(a - h_1 + x)^2 + y^2} + \frac{y}{(h_1 + a - x)^2 + y^2} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

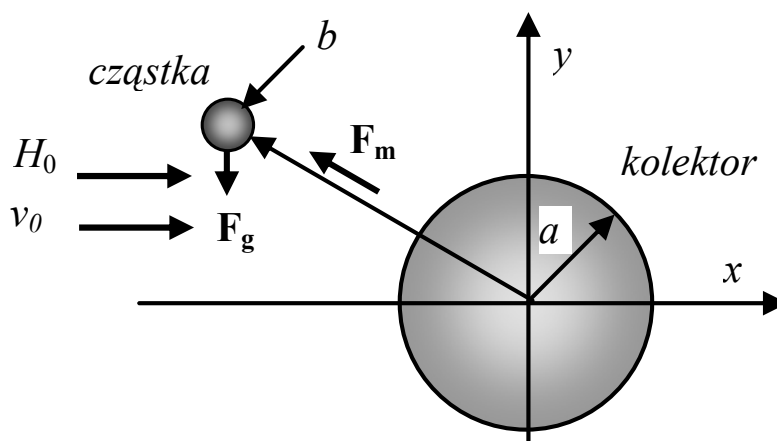
Na podstawie zależności (7) wyznacza się rozkład pola elektrycznego w układzie elektrod występujących w elektrodynamicznym separatorze bębnowym.

3. WYSOKOGRADIENTOWY SEPARATOR MAGNETYCZNY

3.1. Podstawy fizyczne separacji magnetycznej

Praktyczne zastosowanie do ekstrakcji ziaren skrajnie rozdrobnionych i słabomagnetycznych znalazły wysokogradentowe separatory matrycowe (rys. 3). W polu magnetycznym generowanym przez nadprzewodnikowe uzwojenie o konstrukcji osiowo – symetrycznej (solenoid) znajduje się matryca (rys. 4), w której zachodzi proces ekstrakcji cząstek z zawiesiny przepływającej przez separator. Matryca jest kanistrem wypełnionym elementami gradientotwórczymi w postaci wiórek lub waty ferromagnetycznej. Przedstawione urządzenie pracuje jako filtr magnetyczny.

Z matrycy separatora wyodrębnia się jeden kolektor ferromagnetyczny (patrz rys. 4d) i obserwuje się zachowanie pojedynczej cząstki w obszarze niejednorodnego pola magnetycznego wywołanego jego obecnością w zewnętrznym, jednorodnym polu o natężeniu \vec{H}_0 (rys. 7). Cząstka porusza się z prędkością v_0 .



Rys. 7. Kulista cząstka paramagnetyczna o promieniu b , w pobliżu kolektora ferromagnetycznego o promieniu a

Przenikalność względna kolektora wynosi μ_{wk} (przenikalność względna ośrodka wynosi μ_{w0}). Wokół walca pole magnetyczne zniekształca się, a jego analityczny opis przedstawia zależność [4]:

$$\vec{H} = A_0 H_0 \left[\left(1 + \frac{K_c}{r_a^2} \right) \cos \theta \vec{1}_r - \left(1 - \frac{K_c}{r_a^2} \right) \sin \theta \vec{1}_\theta \right]$$

dla $1 < r_a < \frac{b}{a}$ (8)

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \quad \text{dla} \quad \frac{b}{a} < r_a < \infty$$

gdzie:

$$A_0 = 1/(1 - \varepsilon K_c), \quad K_c = (\nu - 1)/(\nu + 1),$$

$$\nu = \mu_{wk} / \mu_{wo} \quad \text{oraz} \quad r_a = r/a.$$

- ε – współczynnik upakowania kolektorów w matrycy,
 K_c – współczynnik określający zniekształcenie pola magnetycznego wokół kolektora.

4. SIŁY DZIAŁAJĄCE NA ZIARNA W PRZESTRZENI ROBOCZEJ SEPARATORA

Model ruchu ziaren w strefie roboczej separatorów uwzględnia trzy podstawowe rodzaje oddziaływań: ziarno – bęben/kolektor, ziarno – ośrodek i grawitacyjne. W tabeli 1 zestawiono zależności opisujące podstawowe siły działające na ziarna zarówno w separatorze bębnowym jak i wysokogradientowym.

TABELA 1

Zestawienie zależności opisujących siły działające w procesie separacji

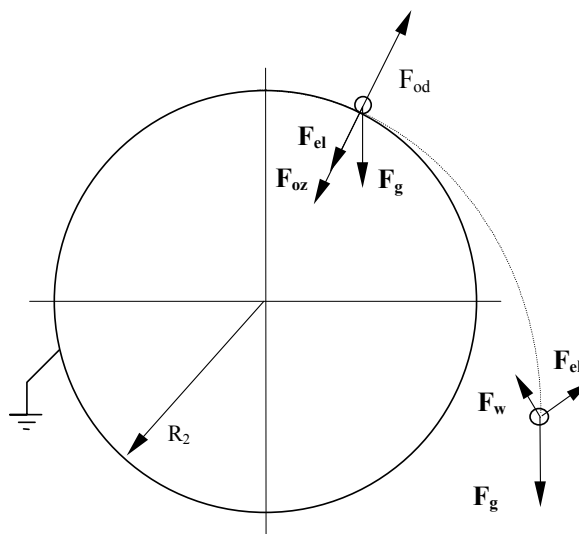
RODZAJ SIŁY	ZALEŻNOŚĆ	
- elektryczna	$\vec{F}_{el} = q\vec{E}$	(9)
- zwierciadlanego odbicia	$\vec{F}_{oz} = q^2 / 4\pi\varepsilon_0 (2\pi R_2^2) \vec{1}_r$	(10)
- odśrodkowa	$\vec{F}_{od} = m\omega^2 R_2 \vec{1}_r$	(11)
- magnetyczna	$\vec{F}_m = \chi V \text{grad} (1/2 \vec{H} \cdot \vec{B})$	(12)
- grawitacyjna	$\vec{F}_g = m\vec{g}$	(13)
- dynamicznego oporu ośrodka	$\vec{F}_w = 6\pi\eta r \vec{v}$	(14)

gdzie :

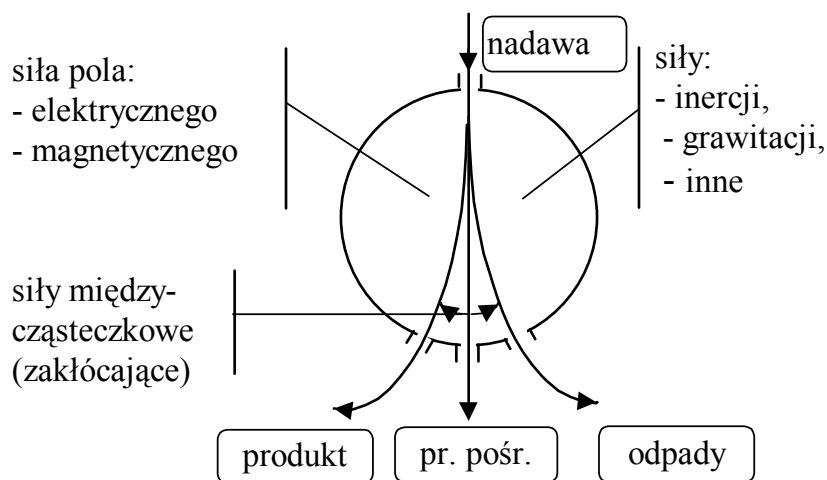
- R_2 [m] – promień bębna (elektrody obrotowej);
- ω [s⁻¹] – prędkość obrotowa bębna;
- g [ms⁻²] – przyspieszenie ziemskie,
- χ – podatność magnetyczna ziarna,
- V – objętość ziarna,
- η [Pa·s] – dynamiczny współczynnik lepkości ośrodka.

Na rysunku 8 przedstawiono rozkład sił działających na ziarno w separatorze bębnowym (rys. 7 przedstawia analogiczną sytuację dla separatora matrycowego).

Efektom działania tych sił jest ekstrakcja ziaren o określonych właściwościach fizycznych z przepływającej przez separator strugi. Diagram sił działających na ziarno w procesie separacji przedstawia rys. 9.



Rys. 8. Diagram sił działających na cząstkę w separatorze bębnowym



Rys. 9. Diagram sił działających na ziarno w strefie rozdziału separatora

Warunkiem skuteczności ekstrakcji ziaren w separatorze jest spełnienie zależności: $\frac{|\vec{F}_s|}{|\vec{F}_g + \vec{F}_d|} \geq 1$. Zatem siła separacji \vec{F}_s (odpowiednio: \vec{F}_e lub \vec{F}_m) działająca na ziarno powinna być dominującą wielkością w procesie rozdziału.

5. NUMERYCZNE WYZNACZANIE TORU ZIAREN

Znając rozkład pola w przestrzeni roboczej separatora i działające na cząstki siły, można wyznaczyć tory ziaren w separatorze.

Równanie sił działających na cząstki znajdujące się w separatorze zapisuje się w postaci [1]:

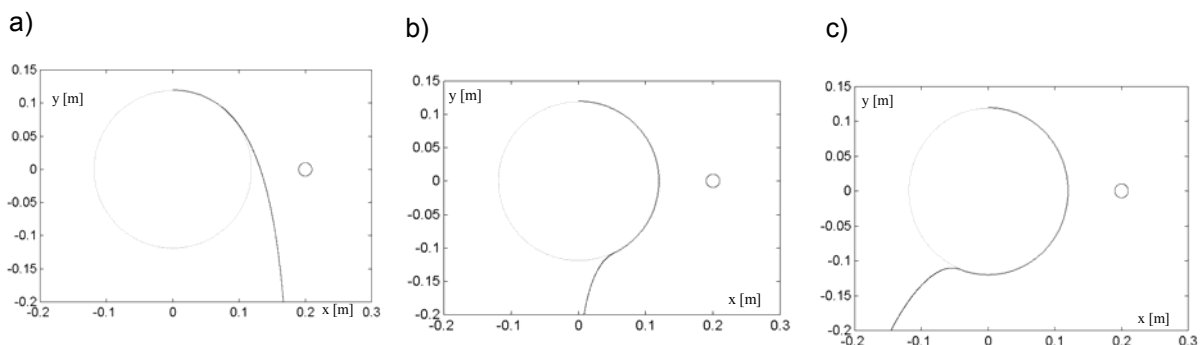
$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F} \quad (15)$$

gdzie :

- $\sum \vec{F}$ [N] – suma wszystkich sił, które działają na ziarno,
- m [g] – masa ziarna.

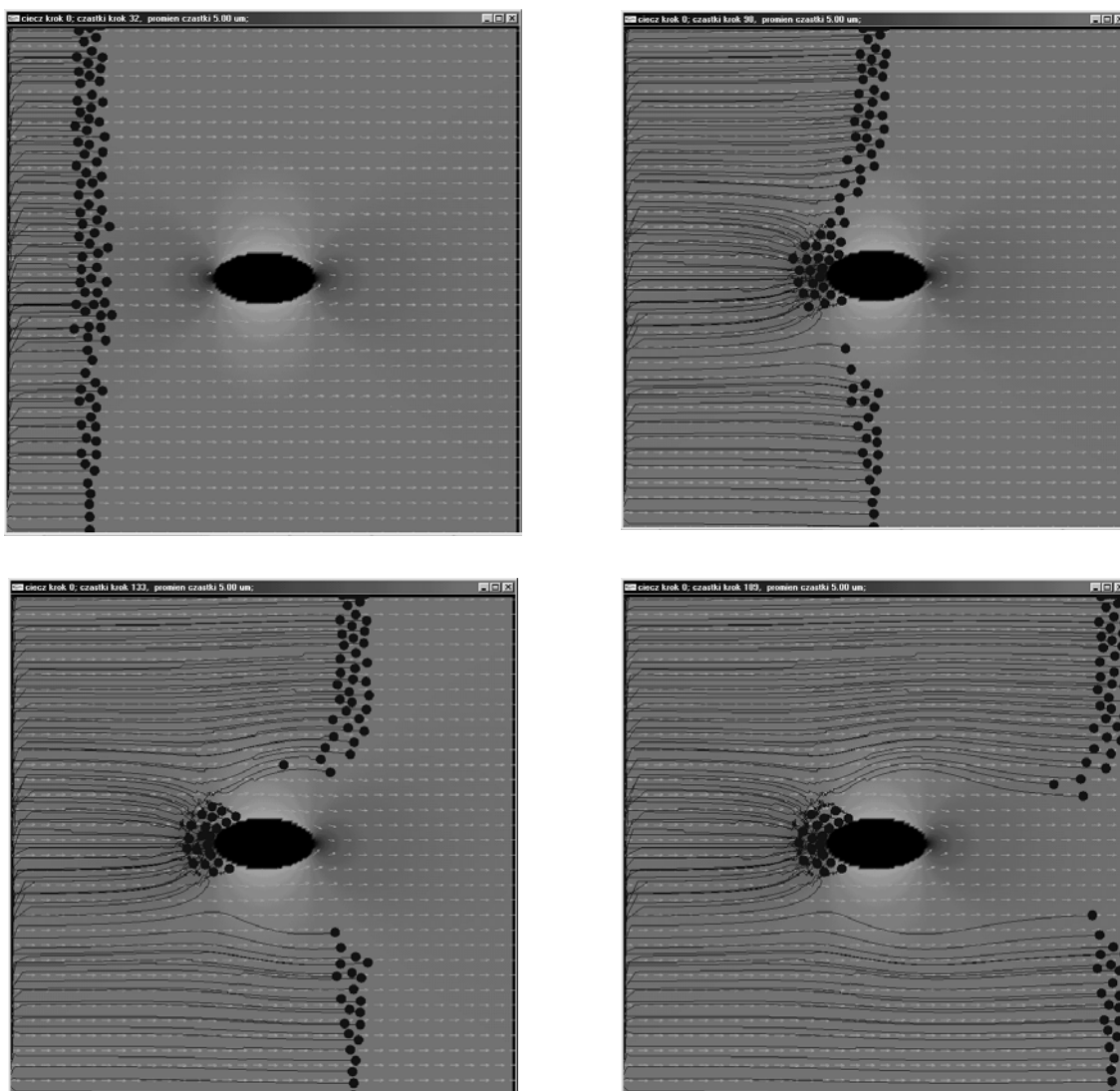
Do numerycznych obliczeń torów ziaren wykorzystano pakiet Matlab.

Na rysunku 10 przedstawiono rezultaty obliczeń kilku torów ziaren w różnych warunkach dynamicznego działania pola na cząstkę znajdującą się w separatorze bębnowym.



Rys. 10. Przykładowe tory cząstek obliczone za pomocą programu komputerowego, dla cząstek o różnej rezystancji R_z ; a) $R_z = 1E4$ [Ω], b) $R_z = 4E6$ [Ω], c) $R_z = 7E6$ [Ω], $U = 20$ [kV] = const; $\omega = 8$ [rads^{-1}] = const

Widać z przedstawionych rezultatów, że czynnikami, które determinują zachowanie się ziarna w przestrzeni roboczej separatora bębnowego są: natężenie pola elektrycznego i właściwości elektryczne ziarna (rezystancja). Przedstawione symulacje trajektorii ziarna pozwalają zatem na określenie podstawowych parametrów technologicznych procesu separacji elektrycznej.



Rys. 11. Kolejne fazy ruchu ziaren wokół kolektora ferromagnetycznego

Rysunek 11 przedstawia tory ziaren wokół kolektora ferromagnetycznego w matrycy separatora wysokogradientowego. Widać, że część ziaren, znajdujących się w strefie wychwytu pojedynczego kolektora, zostaje zatrzymana na jego powierzchni. Ze względu na swoje właściwości magnetyczne, ziarna te

tworzą produkt magnetyczny procesu separacji (filtracji). Pozostałe ziarna, które nie zostały wychwycone przez kolektory, to produkt niemagnetyczny odbierany poza matrycą separatora.

6. PODSUMOWANIE

Prezentowana praca dotyczy istotnego problemu jakim bez wątpienia jest dynamiczne działanie pola elektrycznego i magnetycznego w procesach technologicznych. Analizowany problem rozważany był na przykładzie działania dwóch urządzeń działających na odmiennych zasadach. Każde z nich znajduje praktyczne zastosowanie w przeróbce kopalin. Zwłaszcza magnetyczny separator wysokogradentowy – ze względu na możliwość ekstrakcji ziaren mikrometrowych rozmiarów i słabomagnetycznych – jest powszechnie stosowanym urządzeniem w ciągu technologicznym przeróbki surowców mineralnych.

Efektom skonstruowanego modelu teoretycznego jest komputerowe wyznaczenie trajektorii cząstek w polu elektrycznym i magnetycznym. W symulacji komputerowej uwzględniono wpływ najważniejszych sił działających na cząstkę w polu separatora. Wyniki symulacji dla różnych wartości parametrów ukazują wpływ tych parametrów na trajektorie ziaren w separatorze bębnowym i matrycowym. Uzyskane dane potwierdzają słuszność przyjętego modelu i użyteczność opracowanego programu komputerowego. Pozwalają określić parametry procesu rozdziału ziaren, jeśli znane są ich właściwości elektryczne i magnetyczne. Oprócz konkretnych wniosków wynikających z takich symulacji odnośnie wpływu wybranych parametrów na skuteczność działania separatora, możliwe jest także wskazanie ciekawych obszarów badawczych, które należy podjąć.

LITERATURA

1. CIEŚLA A.: *Analiza stanów pracy separatora matrycowego z elektromagnesem nadprzewodnikowym jako źródłem pola*, Wydawnictwa AGH, seria: Rozprawy, Monografie, Nr 44, Kraków 1996.
2. CIEŚLA A.: *New approach to high voltage electrodynamic drum separator; Part I: Theoretical model* Proc. Eleventh International Symposium on High-Voltage Engineering, London, May 1999. , pp 425-428
3. ZANH M.: *Electromagnetic Field Theory: Problem Solving Approach* (Polish edition by PWN, Warszawa, 1989).

4. MAYUREE NATENAPIT, WIRAT SANGLEK: *Capture radius of magnetic particles in random cylindrical matrices in high gradient magnetic separation*, Journal of Applied Physics, Vol 85 (1999), No 2, pp. 660 -664

Rękopis dostarczono, dnia 12.03.2007 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Jan Sikora

DYNAMIC ACTING ELECTRIC
AND MAGNETIC FIELDS
IN TECHNOLOGICAL PROCESSES

A. CIEŚLA

ABSTRACT *Static electric and magnetic fields – among the others – are used in technological processes (electric and magnetic separation). Electric separation is a process where two or more solid phases, with different value of moment or electric charge, are separated with the forces of the electric field. Magnetic separation is a process of separation two or more solid phases which differ with the magnetic properties. The paper presents operation of the high voltage drum separator and high gradient magnetic filter. Electric and magnetic field in the working space of the devices has been analyzed. Author computed the forces acting on the dielectrics and paramagnetics particles situated in the working space. Paper includes computed trajectories of moving particle in the separators.*