

# Analiza procesu ekstrakcji cząstek w magnetycznym separatorze wysokogradentowym

**Streszczenie.** Osadzanie cząstek mineralnych na elementach ferromagnetycznych separatora wysokogradentowego trwa do chwili uzyskania nasycenia, które określa równowaga sił uczestniczących w procesie ekstrakcji. Określenie stopnia nasycenia kolektorów matrycy jest ważne w pracy separatora HGMS. Model prezentowany w artykule zakłada równowagę sił działających na cząstkę w procesie ekstrakcji. Autorzy badają wpływ rozmiaru cząstek, indukcji magnetycznej, prędkości przepływu zawiesiny, rozmiaru matrycy na proces osadzania cząstek wyznaczając trajektorie cząstek.

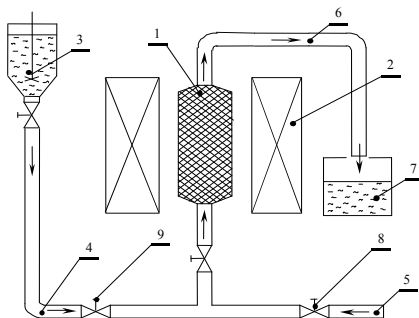
**Abstract.** The buildup of magnetic mineral particles on matrices (extraction of the particles from slurry) determines the saturated deposit volume of the minerals, which is of great importance for the operation of the high gradient magnetic separation (HGMS) system. The buildup of the fine weakly magnetic minerals on matrix is studied with the force equilibrium model. The model of particle buildup on one of the ferromagnetic collector matrix is presented. The influence of the particle size, the magnetic induction, the fluid viscosity, the fluid velocity and the matrix size on the saturated particle buildup is investigated and discussed. **Analysis process of the extraction of the particles in the High Gradient Magnetic Separator.**

**Słowa kluczowe:** osadzanie cząstek, siła magnetyczna, równowaga sił, matryca ferromagnetyczna, separacja wysokogradentowa, **Keywords:** particles buildup, magnetic force, force equilibrium, ferromagnetic matrices, high gradient magnetic separation (HGMS).

## Wstęp

Przedmiotem rozważań pracy jest magnetyczny separator matrycowy: w polu magnetycznym generowanym przez nadprzewodzące uzwojenie o konstrukcji osiowo-symetrycznej (solenoid) znajduje się matryca (kanister wypełniony elementami gradientotwórczymi w postaci włókna lub waty ferromagnetycznej), w której zachodzi proces ekstrakcji cząstek z zawiesiny przepływającej przez separator (rys. 1).

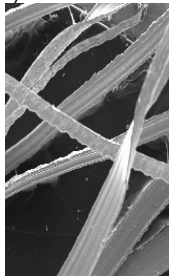
a)



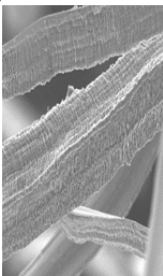
b)



c)



d)



Rys. 1. Matrycowy separator wysokogradentowy:

a) schemat separatora, b) matryca separatora, c) wypełnienie matrycy wata ferromagnetyczną (powiększenie 35x) d) pojedyncze włókno waty ferromagnetycznej (powiększenie 50x)

1 – matryca separatora, 2 – uzwojenie elektromagnesu, 3 – pojemnik separowanej zawiesiny, 4 – strumień separowanej zawiesiny, 5 – strumień wody czyszczącej, 6 – strumień oczyszczonej zawiesiny, 7 – pojemnik produktu separacji, 8, 9 – zawory

W problemie badawczym procesu separacji autorzy koncentrują się na działaniu energii pola magnetycznego w procesie ekstrakcji cząstek o określonych właściwościach

magnetycznych z zawiesiny przepływającej przez matrycę separatora.

Wydzielanie ferromagnetyków nie jest technicznie trudne, ponieważ pola o stosunkowo niewielkiej niejednorodności generują wystarczającą do tego celu siłę. Natomiast ekstrakcja słabych magnetyków lub paramagnetyków jest zagadnieniem trudnym, ale ze względu na istniejące warunki (np. konieczność eksploatacji złóż o coraz słabszych właściwościach magnetycznych, oczyszczanie materiałów stałych z domieszek słabo magnetycznych czy oczyszczanie ścieków) należy je podjąć.

## Model ekstrakcji cząstek w matrycy separatora

W proponowanym przez autorów modelu, przyjmuje się, że przepływająca przez obszar separacji rozpatrywana frakcja traktowana jest jako ośrodek jednorodny, scharakteryzowany takimi wielkościami jak np. koncentracja cząstek, rozkład granulacji, podatność magnetyczna, lepkość. Ponadto czyni się następujące założenia upraszczające:

1. przepływ zawiesiny jest laminarny w całej przestrzeni separatora,
2. koncentracja cząstek w zawieszynie jest stała w danym przekroju poprzecznym komory separatora,
3. prędkość, którą cząstki uzyskują pod działaniem pola magnetycznego przyjmuje się za stałą,
4. kształt ziaren frakcji magnetycznej jest kulisty, a ich średnica jest większa niż  $1 \mu\text{m}$
5. pomija się zjawisko zrywania cząstek osadzonych na kolektorze.

Dla tych podstawowych założeń modelu, a ponadto przyjmując kulisty kształt cząstki, stałość podatności magnetycznej w obrębie objętości cząstki, wzór opisujący siłę działającą ze strony pola magnetycznego na cząstkę, można zapisać w postaci wzoru [1]:

$$(1) \quad \vec{F}_m = \frac{\chi_c(V_c/2)[\nabla(\vec{B} \cdot \vec{B})]}{\mu_0}$$

w którym:  $\chi_c$  jest podatnością magnetyczną cząstki o objętości  $V_c$ ,  $\vec{B}$  indukcją pola magnetycznego,  $\nabla$  operatorem gradientu pola,  $\mu_0$  zaś jest stałą:  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ .

W wyrażeniu (1) człon  $\chi_c V_c$  charakteryzuje fizyczne właściwości cząstek, które mają być wydzielone w procesie separacji (filtracji), natomiast drugi człon tego wyrażenia

charakteryzuje zdolność pola magnetycznego do ekstrakcji cząstek o określonych właściwościach fizycznych (podatność, uziarnienie). Pod wpływem działających w separatorze sił: magnetycznej (1), grawitacji (2) i dynamicznego oporu ośrodka (3), cząstki o określonych własnościach magnetycznych poruszają się po określonych trajektoriach w kierunku kolektora ferromagnetycznego.

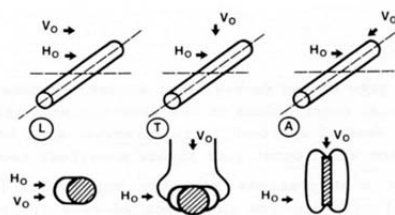
- (2)  $\vec{F}_{gr} = m \cdot \vec{g}$  - siła grawitacji
- (3)  $\vec{F}_{dyn} = 6\pi\eta\vec{v}$  - siła dynamicznego oporu ośrodka

W ogólnej postaci równanie ruchu cząstek w matrycy separatora zapisuje się w postaci:

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

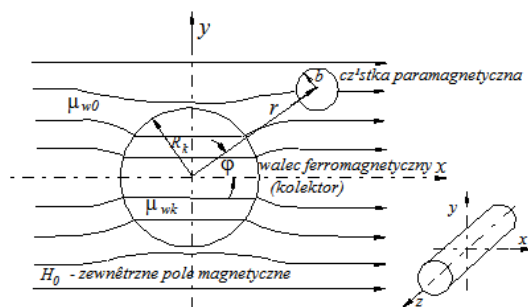
gdzie:  $\sum \vec{F}$  – suma wszystkich sił, które działają na cząstkę (przyjmuje się zwyczajowo trzy wymienione siły),  $m$  [g] - masa cząstki.

Model mikroskopowy procesu osadzania cząstek opisany jest szczegółowo m.in. w [2]. Jak widać na rys.1d, ze względu na różnorodny rozkład kolektorów w matrycy, możliwych jest wiele usytuowań względem siebie dwóch istotnych wielkości procesu reprezentowanych przez wektory: natężenia pola magnetycznego i prędkości przepływu ( $\vec{H}_0$  i  $\vec{v}_0$ ). Trzy podstawowe konfiguracje przedstawia rysunek 2.



Rys.2. Możliwe konfiguracje wzajemnych położenia wektorów natężenia pola magnetycznego  $H_0$  i prędkości przepływu zawiesiny  $v_0$

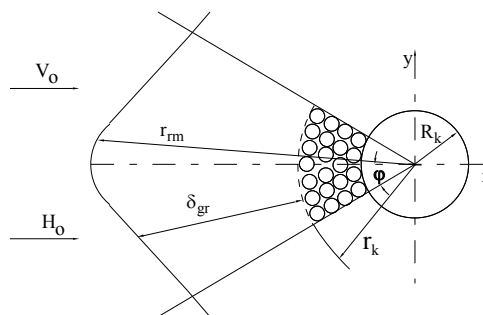
Autorzy do rozważań modelu osadzania cząstek na kolektorze przyjmują standardową konfigurację oznaczoną na rysunku 2 literą „L”. Konfigurację rozważanego modelu pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Kulista cząstka paramagnetyczna w niejednorodnym polu magnetycznym kolektora ferromagnetycznego

Rysunek 4 prezentuje przyjęty przez autorów model, zakładający że osadzanie cząstek na powierzchni kolektora odbywa się kolejnymi warstwami aż do osiągnięcia warstwy, przy której siła pola magnetyczna przestaje być dominującą [3]. Intensywność zatrzymywania cząstek na kolektorze zależy od szeregu czynników, np. wielkości zewnętrz-

niego pola magnetycznego  $H_0$ , prędkości przepływu zawiesiny przez matrycę  $v_0$ , koncentracji objętościowej cząstek w zawieszynie na wejściu matrycy  $C_0$ , promienia cząstki  $b$  i kolektora  $R_k$ , stopnia upakowania kolektorów w matrycy  $\epsilon$ , lepkości ośrodka  $\eta$  i innych.

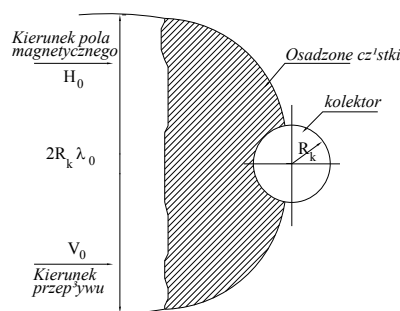


Rys. 4. Model do wyznaczania warstw osadzonych cząstek na powierzchni kolektora ( $r_{fm}$  – maksymalny promień warstwy,  $\delta_{gr}$  – rozmiar warstwy osadzonych cząstek)

Można więc zapisać ogólnie:

(5)  $\frac{dn}{dt} = f(H_0, v_0, b, R_k \epsilon, \eta, n, n_{max})$

W zależności (5), oprócz zdefiniowanych wyżej wielkości:  $n$  jest masą osadzonych cząstek odniesiona do masy jednostkowej kolektora,  $n_{max}$  - maksymalną wartością, którą może osiągnąć  $n$ .



Rys. 5. Osadzanie cząstek na kolektorze

Następnie rozpatruje się sytuację pokazaną na rysunku 5 i przyjmuje się zależność opisującą zmianę masy osadzonych cząstek  $n$  na kolektorze (bez uwzględnienia zrywania cząstek wcześniej osadzonych) w następującej postaci [3]:

(6)  $\pi R_k^2 \rho_m \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = 2R_k \lambda v_0 C(x,t)$

(wielkość  $n$  jest funkcją czasu separacji  $t$  i położenia kolektora w matrycy  $x$ )

w której:  $\rho_m$  jest gęstością materiału kolektora ferromagnetycznego [ $\text{kgm}^{-3}$ ],  $\lambda = \lambda_0 f_\lambda$  – współczynnik określający szerokość strefy wychwyty pojedynczego kolektora,  $\lambda_0$  – jak wyżej, lecz dla stanu początkowego, tzn.  $n = 0$ ,  $f_\lambda$  – funkcja określająca zmianę szerokości strefy wychwyty kolektora w zależności od masy osadzonych cząstek i ma postać:

(7)  $f_\lambda = 1 - \frac{n}{n_{max}}$

a więc spełnia następujące warunki:

(8)  $f_\lambda = \begin{cases} 1, & \text{kiedy } n = 0 \quad (\text{kolektor czysty}) \\ 0, & \text{kiedy } n = n_{max} \quad (\text{kolektor nasycony}) \end{cases}$

Równanie (6) jest inną postacią równania opisującego kinetykę procesu ekstrakcji cząstek w matrycy separatora (9) [3]:

$$(9) \quad \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \beta C(x,t)[A - P(x,t)]$$

w którym:  $P(x,t)$  - koncentracja cząstek frakcji magnetycznej wydzielonych w matrycy separatora [ $\text{kgm}^{-3}$ ],  $C(x,t)$  - koncentracja frakcji magnetycznej przepływającej przez separator [ $\text{kgm}^{-3}$ ],  $A$  - maksymalna wartość koncentracji cząstek zatrzymanych w matrycy ( $A = P(x,t)_{max}$  [ $\text{kgm}^{-3}$ ]),  $\beta$  - współczynnik aktywności procesu osadzania cząstek na kolektorach matrycy.

Współczynnik aktywności  $\beta$  ujmuje – z punktu widzenia rozważań teoretycznych i zastosowań technicznych – całość działania różnych mechanizmów na proces osadzania cząstek z zawiesiny w ośrodku porowatym, zatem charakteryzuje prawdopodobieństwo zaabsorbowania cząstek z zawiesiny. Z porównania zależności (6) i (9) wynika, że

$$(10) \quad \beta = \frac{2\lambda_0 v_0}{\pi R_k \varepsilon} = \frac{2R_k \lambda_0 v_0}{S_k \varepsilon}$$

( $\varepsilon$  – współczynnik upakowania matrycy wata ferromagnetyczną,  $S_k$  – przekrój poprzeczny kolektora)

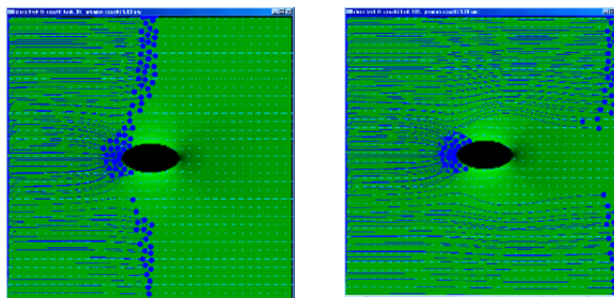
Zdefiniowany zależnością (10) współczynnik  $\beta$  zależy głównie od szerokości strefy wychwytu cząstek przez kolektor:  $2R_k \lambda_0$ . Jest to obszar zawarty między tzw. trajektoriami granicznymi cząstek, z którego będą one wychwytywane przez kolektor, zaś cząstki spoza tego obszaru będą omijać kolektor. Określenie strefy wychwytu kolektora możliwe jest przez wyznaczenie trajektorii (zwłaszcza granicznych) cząstek zmierzających do kolektora pod wpływem siły niejednorodnego pola magnetycznego, do tego zaś niezbędna jest analiza ruchu cząstki.

### Trajektorie cząstek w matrycy separatora

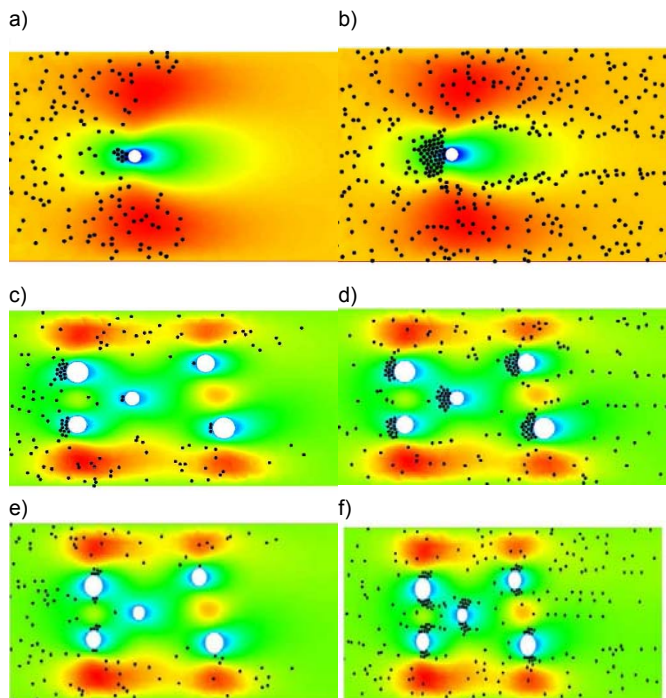
Analiza osadzania cząstek na kolektorze jest złożona i wymaga znajomości wielu mechanizmów. Dla rozwiązania zadania wyznaczenia trajektorii cząstek autorzy proponują uwzględnienie jedynie podstawowych sił działających na cząstkę. Tymi siłami są: siła niejednorodnego pola magnetycznego  $\vec{F}_m$  (1), siła grawitacji  $\vec{F}_{gr}$  (2) i siła dynamicznego oporu ośrodka  $\vec{F}_{dyn}$  w którym porusza się obserwowana cząstka (3). Z własnych obserwacji autorów wynika, że przy ekstrakcji cząstek o małych średnicach, istotną rolę odgrywa siła dynamicznego oporu ośrodka, zwłaszcza w przypadku, gdy separacja przebiega w ośrodku ciekłym, który charakteryzuje się stosunkowo dużym współczynnikiem lepkości. Właściwe jest zatem odniesienie pozostałych sił działających na cząstkę do tej właśnie siły, przy czym należy przyjąć, że przepływ zawiesiny w znacznej odległości od kolektora jest niezaburzony w jego obecności (przyjmuje się zatem przepływ laminarny zawiesiny) [3]. Szczegółowy opis ruchu cząstek w matrycy separatora można znaleźć także m.in. w [2]. Korzystając z zależności (4) zasymulowano ruch cząstek w pobliżu kolektora ferromagnetycznego. Na rysunku 6 pokazano przykłady symulacji ruchu cząstek wokół kolektora.

Podobne symulacje wykonano dla różnych warunków procesu ekstrakcji, kilku kolektorów a także dla konfiguracji wektorów  $\vec{H}_0$  i  $\vec{v}_0$  (zaznaczonych na rys. 2 literą T). Przedstawiono je na rysunku 7.

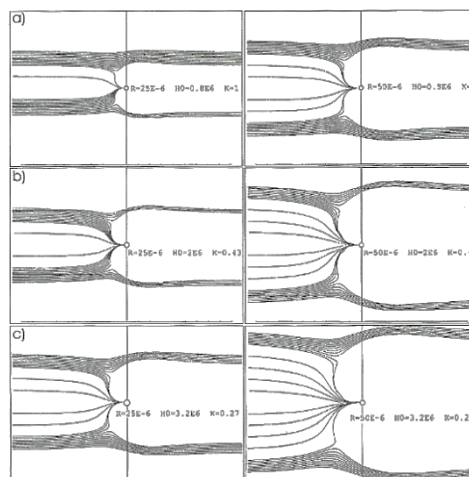
Oprócz symulacji komputerowych ruchu cząstek w pobliżu kolektorów matrycy, autorzy wykonali także numeryczne obliczenia trajektorii cząstek dla przyjętych parametrów ekstrakcji cząstek. Są pokazane na rysunku 8.



Rys. 6. Trajektorie cząstek w pobliżu kolektora



Rys. 7. Obserwacje („stop klatki”) ruchu cząstek wokół kolektorów: a), b) pojedynczy kolektor, c), d) pięć kolektorów w konfiguracji L, e), f) pięć kolektorów w konfiguracji T (oznaczenia L, T z rys. 2)



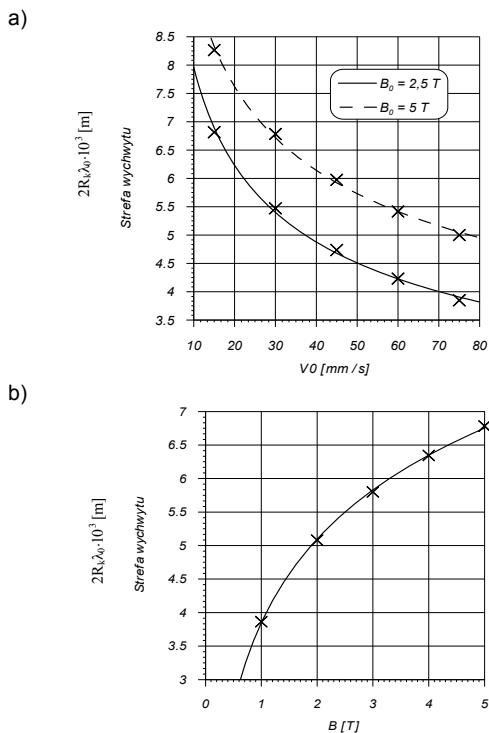
Rys. 8. Trajektorie cząstek zmierzających do kolektora dla trzech wartości indukcji magnetycznej: a)  $B_0 = 1,0$  T; b)  $B_0 = 2,5$  T; c)  $B_0 = 4,0$  T;

Wykonane symulacje i obliczenia pozwoliły wyznaczyć trajektorie graniczne, a tym samym sformułować analityczną zależność wiążącą szerokość strefy wychwytu kolektora z technologicznymi parametrami separacji:

$$(11) \quad 2R_k \lambda_0 = D \left( \frac{4b^2 \chi_c \mu_0 H_0 H_p S_k}{9\pi\eta v_0} \right)^{1/3}$$

$D$  jest stałą liczbową wyznaczoną eksperymentalnie dla konkretnych warunków separacji. Występujące w zależności zostały zdefiniowane powyżej, a także w [3].

W dalszej części analizy procesu ekstrakcji cząstek, autorzy badali wpływ wartości indukcji magnetycznej i prędkości przepływu zawiesiny na szerokość strefy wychwytu kolektora  $2R_k \lambda_0$ . Rezultaty takich badań pokazano na rysunku 9.

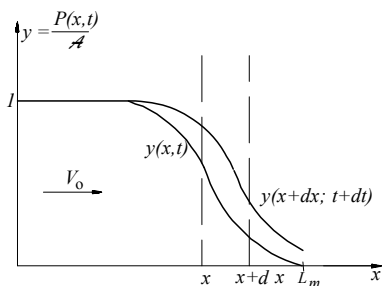


Rys. 9. Strefa wychwytu kolektora ( $2R_k \lambda_0$ ) w funkcji prędkości przepływu zawiesiny przez matrycę (a) i indukcji pola magnetycznego – przy prędkości przepływu zawiesiny  $v_0 = 0,03$  ms<sup>-1</sup> (b) (dla jednego kolektora matrycy)

Pokazane na rys. 9 rezultaty obliczeń, jednoznacznie wskazują wpływ najważniejszych parametrów procesu technologicznego (separacji magnetycznej): wartości indukcji magnetycznej, prędkości przepływu zawiesiny przez matrycę separatora, na jego skuteczność reprezentowaną tu przez szerokość strefy wychwytu.

### Efekt sufozji

Wraz z przepływem zawiesiny wzdłuż matrycy wysycają się kolejne kolektory i warstwy matrycy. Pokazuje to rysunek 10.



Rys. 10. Wsysycanie kolejnych warstw matrycy

Równocześnie z osadzaniem cząstek występuje ich zrywanie przez przepływającą zawiesinę (proces ten nazywano **sufozją**). Sufozja występuje na wszystkich etapach

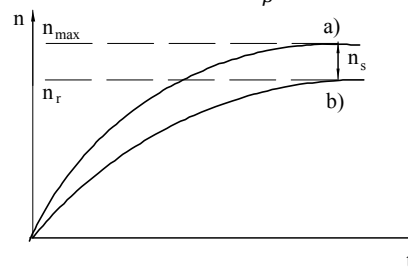
procesu osadzania cząstek, nie tylko przy wysyceniu kolektorów. Tak więc rzeczywiście zgromadzona ilość cząstek na kolektorach matrycy jest mniejsza. Zmianę ilości osadzonych na kolektorze cząstek  $n$  podczas przepływu zawiesiny z uwzględnieniem sufozji, autorzy proponują opisać równaniem w następującej postaci:

$$(12) \quad \frac{dn(x,t)}{dt} = \beta(n_{max} - n) - \nu n$$

( $\nu$  jest współczynnikiem charakteryzujący proces sufozji)

Ostatecznie:

$$(13) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} n = \frac{n_{max}}{1 + \frac{\nu}{\beta}}$$



Rys. 11. Przebieg osadzania cząstek na kolektorze: a) teoretyczny, b) rzeczywisty

Krzywa „a” na rysunku 11 obrazuje przypadek teoretyczny osadzania, gdy nie uwzględnia się sufozji. Krzywa „b” przedstawia ten sam proces, lecz w warunkach rzeczywistych, tzn. z uwzględnieniem sufozji.

Efekt sufozji jest trudny do ilościowego opisu, a wyznaczenie współczynnika  $\nu$  charakteryzującego to zjawisko wymaga odrębnych badań.

### Wnioski

Analiza sił w przedstawionym w pracy modelu mikroskopowym pozwala ocenić wpływ istotnych czynników na skuteczność ekstrakcji cząstek o określonych własnościach magnetycznych z zawiesiny na pojedynczym kolektorze matrycy. W sposób jednoznaczny wykazano, że najważniejszy parametr modelu, jakim jest współczynnik aktywności osadzania cząstek na powierzchni kolektorów matrycy (szerokość strefy wychwytu  $2R_k \lambda_0$ ), istotnie zależy od wartości indukcji pola magnetycznego i prędkości przepływu zawiesiny przez matrycę separatora. Stosowanie w procesie ekstrakcji cząstek w separatorze wysokogradientowym silnych pól magnetycznych (rzędu kilku tesli) umożliwiło zwiększenie przepływu zawiesiny przez matrycę z zachowaniem założonej skuteczności separacji. Zatem powiązanie dwóch dyscyplin nauki: krio-elektrotechniki i inżynierii mineralnej znacznie rozszerza możliwości separacji magnetycznej.

**Autorzy:** prof. n.z. AGH, dr hab. inż. Antoni **Cieśla**, Akademia Górniczo - Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [aciesla@agh.edu.pl](mailto:aciesla@agh.edu.pl), dr inż. Mikołaj **Skowron**, Akademia Górniczo - Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [mskowro@agh.edu.pl](mailto:mskowro@agh.edu.pl).

### LITERATURA

- [1] Cieśla A.: *Wybrane aspekty pracy elektrycznych i magnetycznych separatorów odchylających*, XLI IC SPETO, 2018, pp. 7 - 8.
- [2] Xiayu Zheng, Yuhua Wang, Dongfang Lu: *Study on buildup of fine weakly magnetic minerals on matrices in high gradient magnetic separation*, Physicochem. Probl. Miner. Process. 53(1), 2017, 94-109.
- [3] Cieśla A.: *Analiza stanów pracy separatora matrycowego z elektromagnesem nadprzewodnikowym jako źródłem pola*. Wyd. AGH, nr 44 (seria: Monografie), 1996.