

doi:10.15199/48.2020.02.06

## Wpływ wartości indukcji magnetycznej na efektywność pracy wysokogradentowego separatora magnetycznego HGMS

**Streszczenie.** Przedmiotem rozważań pracy jest jedno z rozwiązań konstrukcyjnych magnetycznych separatorów wysokogradentowych jakim jest separator matrycowy. W polu magnetycznym generowanym przez nadprzewodzące uzwojenie o konstrukcji osiowo - symetrycznej (solenoid) znajduje się matryca (kanister wypełniony elementami gradientotwórczymi w postaci wiórek lub waty ferromagnetycznej), w której zachodzi proces ekstrakcji cząstek z zawiesiny przepływającej przez separator. Wysokogradentowy separator matrycowy (HGMS) pracuje cyklicznie: po okresie napełnienia matrycy produktem magnetycznym (efektywny czas pracy separatora), następuje okres czyszczenia matrycy, tzn. przywracanie jej zdolności akumulacyjnych (czas martwy). Proces technologiczny jest efektywny, jeśli czas napełniania matrycy jest długi, zaś czas martwy - krótki. Wydłużenie czasu efektywnego możliwe jest m. in. poprzez stosowanie pól magnetycznych o dużych wartościach indukcji magnetycznej.

**Abstract.** The subject of deliberation in this paper is one of the constructional solutions of high gradient magnetic separators, which is a matrix separator. In the magnetic field generated by the superconducting winding of the axial-symmetric construction (solenoid), there is a matrix (a canister filled with gradient forming elements in the form of chips or ferromagnetic steel wool), in which the process of extracting particles from the slurry flowing through the separator takes place. The high gradient matrix separator (HGMS) works cyclically: filling the matrix with a magnetic product (effective operation time), is followed by period of matrix cleaning, i.e. restoring its storage capacity (still time). The technological process is effective if the time of filling the matrix is long and still time is short. Prolonging the effective time is possible, through e.g. application of magnetic fields with high values of magnetic induction. **Influence of the magnetic field induction on the effectivity of superconducting high gradient magnetic separator HGMS)**

**Słowa kluczowe:** separacja magnetyczna, separator matrycowy, pole magnetyczne, nadprzewodnictwo, kształtowanie uzwojenia.

**Keywords:** magnetic separation, matrix separator, magnetic field, superconductivity, coil calculations.

### Wprowadzenie

W inżynierii mineralnej pojawiła się nowa forma technik separacji magnetycznej. Polega ona na zastosowaniu elektromagnesu nadprzewodnikowego do wzbudzenia pola magnetycznego w separatorach. Separatorzy takie stwarzają możliwości osiągnięcia efektów, które dotychczas były technicznie trudne do uzyskania, lub zastąpienia technologii klasycznych technologiami nowoczesnymi o dużych walorach ekonomicznych. Jest to możliwe dzięki stosowaniu pól magnetycznych o znacznych wartościach indukcji i silnej niejednorodności (uzyskiwane wartości gęstości siły pola magnetycznego są rzędu  $2 \cdot 10^{12}$  N/m<sup>3</sup>). Separatorzy takie nazwano separatorami wysokogradentowymi (High Gradient Magnetic Separators - HGMS). Zatem połączenie dyscyplin nauki i techniki takich jak: krioelkrotechnika i przeróbka kopalni znacznie rozszerza możliwości separacji magnetycznej.

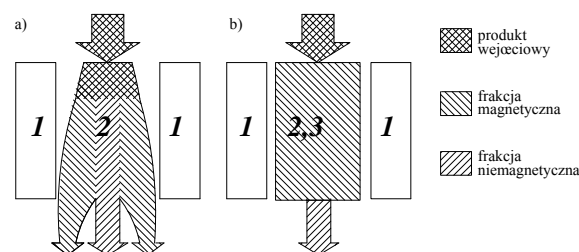
W problemie badawczym procesu separacji magnetycznej z wykorzystaniem elektromagnesów nadprzewodnikowych można wyróżnić dwa aspekty: działania energii pola magnetycznego w procesie ekstrakcji produktu magnetycznego z zawiesiny w matrycy separatora, oraz reakcji układu separator - elektromagnes na działanie energii wydzielanej w dynamicznych stanach pracy elektromagnesu, związanych z przywracaniem matrycy zdolności akumulacyjnych.

W aspekcie pierwszym mieszczą się zagadnienia modelowania procesu separacji i doboru parametrów decydujących o skuteczności i efektywności procesu technologicznego, aspekt drugi zaś obejmuje zagadnienia analizy stanów dynamicznych separatora, tzn. ruchu matrycy (ferromagnetycznego ośrodka porowatego) w polu magnetycznym i określenie skutków mechanicznych a także temperaturowych tych stanów. W obu aspektach badawczych dominującą rolę odgrywa wartość indukcji magnetycznej, przy której prowadzony jest proces technologiczny (proces separacji).

### Typy separatorów wysokogradentowych

W praktyce inżynierii mineralnej wykorzystywane są rozwiązania konstrukcyjne separatorów z wykorzystaniem

magnesów nadprzewodnikowych: separatorzy odchylające i matrycowe (rys.1) [1]. Prezentowane separatorzy pracują wg odmiennej kinetyki: separator odchylający charakteryzuje się ciągłością pracy (produkty separacji odprowadzane są na zewnątrz urządzenia), zaś separatorzy matrycowe pracują cyklicznie – następuje stopniowe wypełnianie matrycy separatora produktem separacji, po jej wypełnieniu konieczne jest przerwanie procesu i przywrócenie matrycy właściwości akumulacyjnych (rys.2).



Rys.1. Separatorzy wysokogradentowe:

a) odchylający, b) matrycowy;

1 – źródło pola magnetycznego, 2 – przestrzeń robocza separatora, 3 – matryca ferromagnetyczna separatora

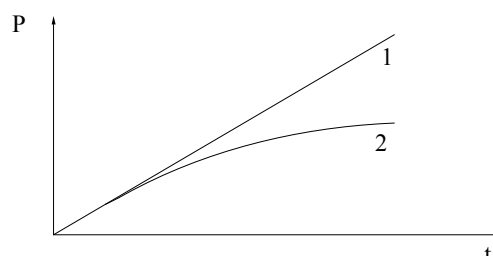


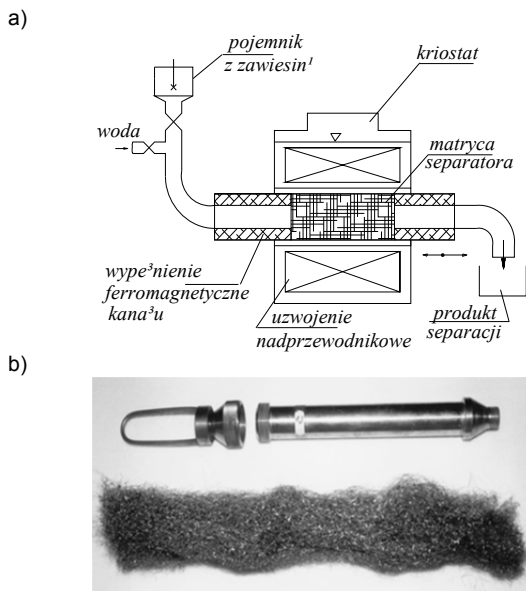
Fig. 2. Kinetyka procesu separacji w separatorze odchylającym (z rys. 1a) – krzywa 1 i w separatorze matrycowym (z rys. 1b) – krzywa 2.

P – produkt magnetyczny uzyskiwany w trakcie separacji, t – czas separacji.

Przedmiotem rozważań jest separator matrycowy (rys. 3).

Konstrukcja separatorów matrycowych różni się zasadniczo od konstrukcji separatorów odchylających: źródłem

poła magnetycznego jest prostsze w budowie uzwojenie solenoidalne. Niejednorodność pola wytwarzana jest nie przez kształt uzwojenia, lecz przez elementy ferromagnetyczne (np. kulki, wióra, watę stalową – rys. 3b) ) umieszczone wewnątrz matrycy wprowadzonej w pole magnetyczne. Cząstki frakcji magnetycznej z przepływającej przez matrycę zawiesiny osadzają się na elementach ferromagnetycznych (kolektorach). Pozostałe cząstki (frakcja niemagnetyczna) przepływają swobodnie przez matrycę odbierane są poza separatorem.



Rys. 3. Schemat separatora matrycowego (a), matryca separatora i jej wypełnienie (wata ferromagnetyczna) (b)

O skuteczności separacji w tego typu separatorze decyduje – obok właściwości elementów ferromagnetycznych (rozmiar, właściwości magnetyczne) – głównie indukcja pola magnetycznego przy której prowadzi się proces technologiczny. W pracy autor analizuje ten aspekt separacji magnetycznej.

### Ekstrakcja cząstek w matrycy separatora

W prezentowanej w pracy metodzie gradientowej, głównym zagadnieniem jest wytworzenie dostatecznie dużej siły magnetycznej, która zapewniłaby wydzielenie frakcji magnetycznej. Przy przyjęciu określonych uproszczeń (kulisty kształt cząstki, stałość podatności magnetycznej w obrębie objętości cząstki), wzór na siłę działającą ze strony pola magnetycznego na cząstkę, można zapisać w postaci [1]:

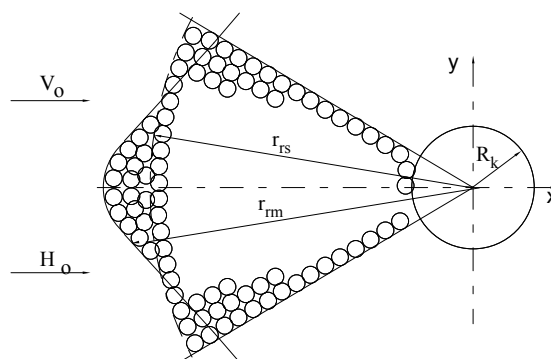
$$(1) \quad \vec{F}_m = \chi_c (V_p / 2) [\nabla (\vec{B} \cdot \vec{B})] / \mu_0$$

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

W wyrażeniu (1) człon  $\chi_c V_p$  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).

Proces osadzania cząstek magnetycznych na włóknie waty ferromagnetycznej (kolektorze o promieniu  $R_k$ ) pod wpływem sił działających na cząstkę (magnetycznej, dynamicznego oporu ośrodka, grawitacji) jest złożony i wymaga przyjęcia kolejnych uproszczeń. Model mikroskopowy procesu osadzania cząstek opisany jest szczegółowo m.in. w [2]. Na

rysunku 4 autor prezentuje model, który zakłada, że osadzanie cząstek na powierzchni kolektora odbywa się kolejnymi warstwami aż do osiągnięcia warstwy, przy której siła pola magnetyczna przestaje być dominującą. [3].



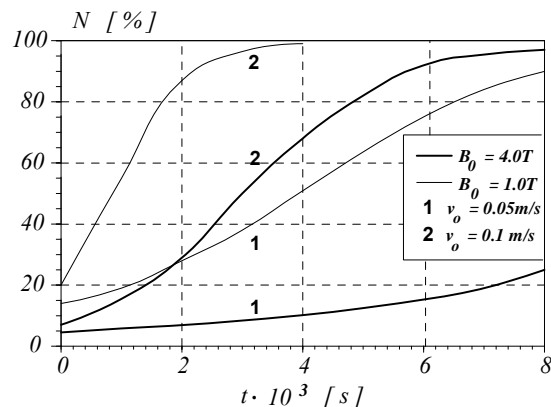
Rys. 4. Model osadzania cząstek na kolektorze do wyznaczenia promienia maksymalnego ( $r_{fm}$ ) i średniego ( $r_{rs}$ ) warstwy granicznej

Model ten umożliwia wyznaczenie zarówno maksymalnego ( $r_{fm}$ ) jak i średniego ( $r_{rs}$ ) promienia równowagi sił działających na ziarno. W chwili, w której na wszystkich włóknach ferromagnetycznych matrycy wystąpi osadzenie maksymalnej liczby cząstek, matryca separatora traci zdolności akumulacyjne.

Z punktu widzenia postawionej w pracy tezy o wpływie wartości indukcji magnetycznej na skuteczność separacji, interesujące jest prześledzenie zmian koncentracji cząstek magnetycznych na wyjściu separatora  $C_{wy}(t)$ . Stosunek tej wielkości do koncentracji na wejściu separatora  $C_0$  autor definiuje jako skuteczność separacji  $N$ :

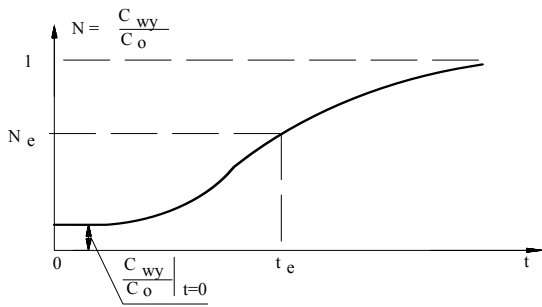
$$(2) \quad N = \frac{C_{wy}(t)}{C_0}$$

Na rysunku 5 przedstawiono zależność parametru  $N$  =  $f(t)$  dla dwóch wartości indukcji magnetycznej  $B_0$  i dwóch wartości prędkości przepływu zawiesiny przez matrycę  $v_0$ .



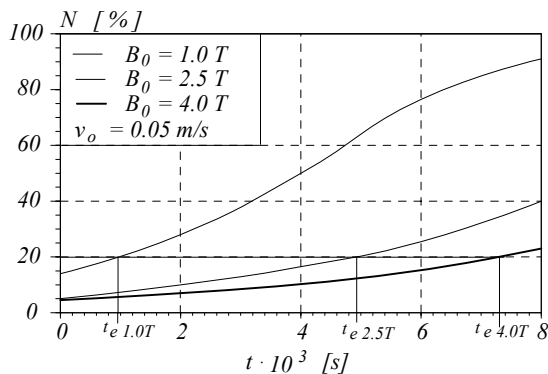
Rys. 5. Zmiana koncentracji cząstek na wyjściu matrycy separatora (współczynnik  $N$  w funkcji czasu trwania separacji  $t$ )

Jak widać, koncentracja cząstek na wyjściu separatora odniesiona do koncentracji wejściowej  $C_0$  zmienia się znacznie z wpływem czasu separacji. Jeżeli żądać się będzie określonej koncentracji zawiesiny na wyjściu separatora, to proces separacji należy przerwać po upływie czasu, który jest efektywnym czasem pracy separatora i oznaczony symbolem  $t_e$ . Po upływie czasu  $t_e$  współczynnik  $N$  przekroczy założoną wartość. Sposób określania czasu  $t_e$  przedstawiony jest graficznie na rysunku 6 (żądaną koncentrację oznaczono  $N_e$ ).



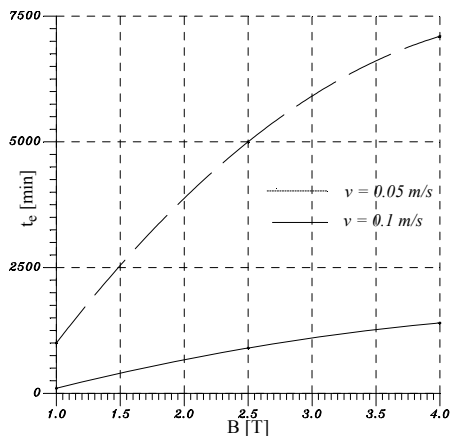
Rys. 6. Wyznaczenie efektywnego czasu separacji  $t_e$  dla założonej skuteczności  $N_e$

Rysunek 7 pokazuje zależność  $N = f(t)$  dla trzech wartości indukcji magnetycznej  $B_0$ . Przyjęto, że wartość  $N_e$  nie przekroczy 20 %. Widać, że ze wzrostem wartości indukcji magnetycznej istotnie wydłuża się efektywny czas pracy separatora.



Rys. 7. Wpływ wielkości indukcji magnetycznej  $B_0$  na długość efektywnego czasu separacji  $t_e$

Na rysunku 8 pokazano zależność efektywnego czasu separacji od wartości indukcji magnetycznej dla dwóch wartości prędkości przepływu zawiesiny  $v_0$ .



Rys. 8. Efektywny czas separacji  $t_e$  w funkcji indukcji magnetycznej  $B_0$

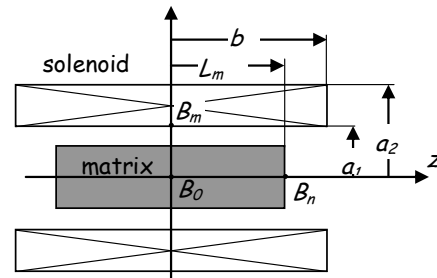
Ogólnie można zapisać, że efektywny czas pracy separatora matrycowego  $t_e$  jest funkcją kilku istotnych parametrów separacji:

$$(3) \quad t_e = t_e(B_0, v_0, L_m, R_k, \varepsilon)$$

W zależności (3)  $L_m$  jest długością matrycy,  $R_k$  – promieniem kolektora (włókna ferromagnetycznego),  $\varepsilon$  – współczynnikiem upakowania matrycy matrycą ferromagnetyczną. Spośród wymienionych parametrów, indukcja pola magnetycznego odgrywa zasadniczą rolę, co potwierdzają wykresy prezentowane na rysunku 8. Jak wspomniano wyżej, po upływie czasu  $t_e$  należy przerwać proces separacji i przywrócić zdolności akumulacyjne matrycy separatora.

### Rozkład pola magnetycznego w przestrzeni roboczej separatora

Opisany wyżej proces ekstrakcji frakcji magnetycznej z przepływającej przez matrycę separatora zawiesiny odbywa się w przestrzeni roboczej separatora, w której panuje indukcja pola o wartości  $B_0$ . Dla zapewnienia takich samych warunków separacji, rozkład indukcji pola powinien gwarantować równomierny jej rozkład. W opisywanym typie separatorów najbardziej powszechnym uzwojeniem stosowanym do wzbudzenia pola jest uzwojenie osiowo-symetryczne. Szkic do wyznaczenia rozkładu indukcji magnetycznej w przestrzeni roboczej separatora pokazano na rys. 9. Obszar zaciemniony na szkicu, to obszar zajęty przez matrycę separatora. Charakterystyczne parametry uzwojenia, zarówno geometryczne jak i elektryczne zestawiono w tabeli 1.



Rys. 9. Konfiguracja uzwojenia solenoidalnego dla separatora matrycowego

Tabela 1. Parametry charakteryzujące uzwojenie solenoidalne

PARAMETRY GEOMETRYCZNE	
$2 a_1$	– wewnętrzna średnica solenoidu,
$2 a_2$	– zewnętrzna średnica solenoidu,
$2 b$	– długość solenoidu,
$2 L_m$	– długość matrycy.
Parametry geometryczne solenoidu powiązane są zależnościami:	
$\frac{a_2}{a_1} = \alpha$ ;	$\frac{b}{a_1} = \beta$ ;
	$\frac{L_m}{a_1} = \beta_e$ .
PARAMETRY ELEKTRYCZNE	
$J$	– średnia gęstość prądu w solenoidzie,
$B_0$	– indukcja magnetyczna w centrum solenoidu,
$B_m$	– maksymalna wartość indukcji magnetycznej na wewnętrznej powierzchni solenoidu w położeniu środkowym,
$B_n$	– wartość indukcji magnetycznej na końcu matrycy.

Podstawowe zależności umożliwiające wyznaczenie rozkładu indukcji magnetycznej w przestrzeni roboczej separatora są określone zależnościami (4 – 7) [4]. W zależnościach tych występują związki geometryczne zapisane w tabeli 1.

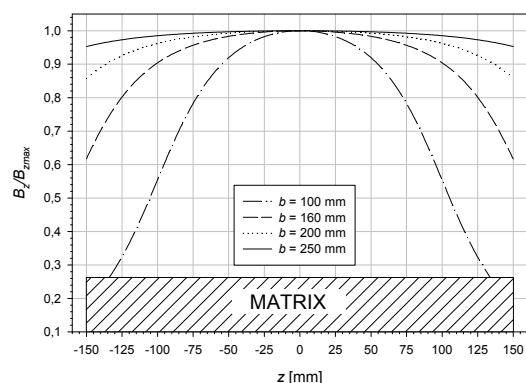
$$(4) \quad B_0 = \mu_0 a_1 J K_0(\alpha, \beta)$$

$$(5) \quad K_0(\alpha, \beta) = \beta \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}}$$

$$(6) \quad V = 2\pi a_1^3 \beta (\alpha^2 - 1)$$

$$(7) \quad v(\alpha, \beta) = \frac{V}{2\pi a_1^3} = \beta (\alpha^2 - 1)$$

Ponadto  $V$  jest objętością solenoidu. Jeśli uzwojenie wykonano z nadprzewodnika, w obliczeniach należy uwzględnić charakterystykę nadprzewodnika, a więc zależność gęstości prądu od natężenia pola magnetycznego. W [4] autor analizuje taki przypadek.



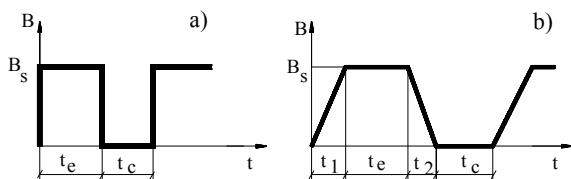
Rys. 10. Rozkład indukcji magnetycznej (składowej  $z$ ) – wielkości względne – dla  $z = 0$  dla konfiguracji z rys. 9.

Z analizy wykresów prezentowanych na rysunku 10 wynika, że długość matrycy determinuje długość uzwojenia solenoidu: dla zapewnienia takich samych warunków procesu separacji, długość uzwojenia powinna zdecydowanie przekraczać długość matrycy ( $b > L_m$ ). W przeciwnym razie końce matrycy znajdują się w zdecydowanie niższej wartości indukcji. Wiąże się to jednak z użyciem znacznej ilości przewodu do nawinięcia solenoidu. W przypadku przewodu nadprzewodnikowego istotnie wzrastają koszty uzwojenia.

W związku z powyższym autor w [4] proponuje dwa inne rozwiązania konstrukcji solenoidu, które gwarantują równomierny rozkład indukcji w przestrzeni roboczej separatora. Pierwsze z nich polega na wykonaniu na końcach solenoidu dodatkowych zwojów, które zwiększają wartość indukcji na końcach przestrzeni separacyjnej, drugie zaś polega na podzieleniu uzwojenia na kilka sekcji i zasilanie każdej z nich prądem o odpowiedni dobranej wartości gęstości prądu. Ze względu na trudności związane z realizacją takich rozwiązań, w praktyce najczęściej stosowana jest klasyczna konstrukcja uzwojenia.

### Cykliczny charakter pracy separatora matrycowego

Wysokogradientowy separator matrycowy pracuje cyklicznie. Po okresie napełniania matrycy cząstkami z zawiesiny (efektywny czas pracy  $t_e$ ) następuje okres czyszczenia matrycy (czas  $t_c$ ). Przedstawia to rysunek 11. W przebiegu rzeczywistym uwzględniono czas zasilania elektromagnesu dla uzyskania indukcji  $B_s$  przy której zachodzi proces separacji (czas  $t_1$ ) i czas wyłączenia elektromagnesu (czas  $t_2$ ).



Rys. 11. Cykl pracy separatora matrycowego: a) teoretyczny, b) rzeczywisty

Tak więc czas, w którym separator nie pracuje (czas martwy  $t_m$ ) jest sumą czasów:

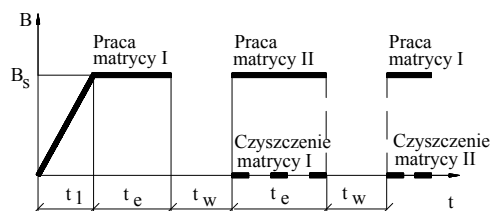
$$(8) \quad t_m = t_1 + t_2 + t_c$$

Zależność wiążącą oba zdefiniowane czasy  $t_e$  i  $t_m$  z wielkościami charakteryzującymi proces separacji (wydajność procesu  $Q_s$ , prędkość przepływu zawiesiny  $v_0$ , przekroju matrycy  $S_m$ ) autor definiuje w postaci [3]:

$$(9) \quad Q_s = \frac{v_0 S_m}{1 + \frac{t_m}{t_e}}$$

Z zależności (9) wynika wniosek, że praca separatora powinna przebiegać przy maksymalnie wydłużonym czasie efektywnym i skróconym do minimum czasie martwym. Wcześniej wykazano, że wydłużenie czasu martwego jest wynikiem m.in. zwiększenia indukcji pola magnetycznego (rys. 8). Skracanie czasu martwego możliwe jest na kilka sposobów, przy czym w niniejszej pracy analizowane będą te spośród nich, które mają ścisły związek z pracą elektromagnesu nadprzewodnikowego. Autor zakłada bowiem, że tego typu uzwojenie jest wykorzystywane do wzbudzenia silnego pola. Sposobami tymi są:

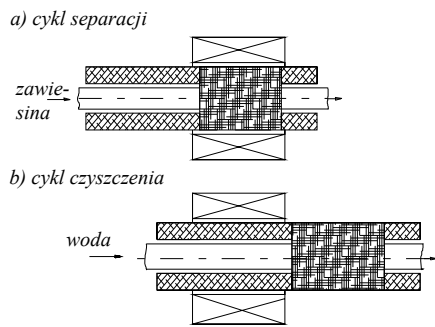
- *wymiana matryc przy odwzbudzonym elektromagniesie;* (istotą sposobu jest zastąpienie matrycy napełnionej na czystą przy  $B_s = 0$  - cykl pracy separatora i elektromagnesu przebiega według rysunku 11b; wymagane jest zatem szybkie załączanie i wyłączenie źródła pola),
- *wymiana matryc bez odwzbudzania elektromagnesu;* (istotą sposobu jest, że usunięcie matrycy napełnionej i wprowadzenie w ten obszar matrycy czystej odbywa się w obecności pola magnetycznego o indukcji  $B_s$ ). Czas martwy ograniczony jest wówczas tylko do czasu niezbędnego do wymiany matryc  $t_w$  ( $t_m = t_w$ ), a cykl pracy urządzenia przebiega zgodnie z rysunkiem 12.



Rys. 12. Cykl pracy separatora wysogradientowego z wymianianymi matrycami w obecności pola magnetycznego

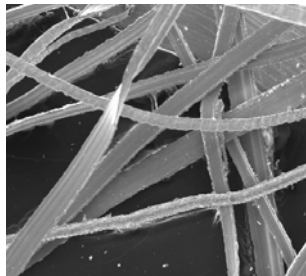
Właściwy jest ten sposób, który zapewnia minimalny czas martwy w cyklu technologicznym, przy równoczesnym zapewnieniu stabilnej pracy elektromagnesu nadprzewodnikowego. Napełniona produktem magnetycznym matryca musi być wymieniona na czystą celem przywrócenia jej zdolności akumulacyjnych. Proces separacji zawiesiny w przedstawionym urządzeniu przebiega w dwóch cyklach pokazanych na rysunku 13:

- 1) *cykl separacji:* matryca umieszczona jest w centralnym położeniu kanału elektromagnesu. Z przepływającej przez matrycę zawiesiny kolektory wychwytywać produkt magnetyczny; produkt niemagnetyczny przepływa przez ośrodek porowaty i gromadzi się w odbieralniku.
- 2) *cykl czyszczenia:* matryca znajduje się poza zasięgiem pola magnetycznego. Umożliwia to zamianę kanistra napełnionego produktem magnetycznym na czysty. Następnie matrycę o zregenerowanych właściwościach akumulacyjnych przesuwamy do roboczej strefy separacji, w ten sposób separator przygotowany jest do pracy w cyklu separacji.



Rys. 13. Cykl pracy separatora matrycowego

**Ruch matrycy separatora w polu magnetycznym**  
Matryca separatora jest ośrodkiem porowatym.



Rys. 14. Włókna waty ferromagnetycznej wypełniającej matrycę separatora (powiększenie 35-krotne)

Wypełnieniem matrycy jest w rozpatrywanej konstrukcji separatora nierdzewna wata ferromagnetyczna. Współczynnik wypełnienia matrycy watą (współczynnik upakowania)  $\varepsilon$  definiuje się jako:

$$(10) \quad \varepsilon = \frac{V_{ckol}}{V_{matr}} 100\%$$

gdzie:  $V_{ckol}$  całkowita objętość waty (kolektorów ferromagnetycznych),  $V_{matr}$  całkowita objętość matrycy. W rzeczywistych warunkach  $\varepsilon$  osiąga wartość (5 – 15)%. Na rysunku 14 pokazano 35-krotne powiększenie włókien waty w wypełniającej fragmencie matrycy.

Zachowanie się takiego ośrodka porowatego przy jego przesuwaniu w obecności pola magnetycznego jest różne od zachowania się litego ferromagnetyka o objętości równoważnej objętości matrycy. W [3] autor wyznaczył zastępczą przenikalność matrycy  $\mu_z$  wypełnionej watą ferromagnetyczną w postaci zależności:

$$(10) \quad \mu_z = \frac{1}{2} \left[ \frac{\mu_p q_p}{q_p + \mu_p(1 - q_p)} + 2 - q_p + q_a^2(\mu_a - 1) \right]$$

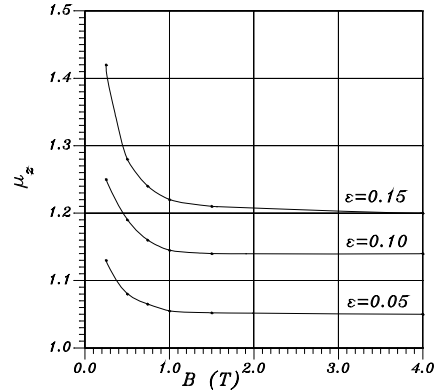
w której:  $\mu_a, \mu_p$  – względne przenikalności kolektorów ferromagnetycznych zorientowanych odpowiednio równolegle i prostopadłe do linii sił pola magnetycznego,  $q_a, q_p$  – względne wymiary geometryczne przestrzeni matrycy zajętej przez kolektory zorientowane odpowiednio równolegle i prostopadłe do linii sił pola magnetycznego. Dla przyjętej charakterystyki magnesowania waty ferromagnetycznej, zostały obliczone z zależności (10) przenikalności zastępczej  $\mu_z$  matrycy dla trzech wartości współczynnika upakowania  $\varepsilon$ . Rezultaty obliczeń przedstawiono na rys. 15.

Przy wymianie matryc w obecności pola magnetycznego należy pokonać siłę, z którą pole to działa na matrycę jako element ferromagnetyczny (przemieszczanie matrycy w

obszarze pola magnetycznego filtra przedstawiono na rys. 13.) Siła ta dana jest wzorem:

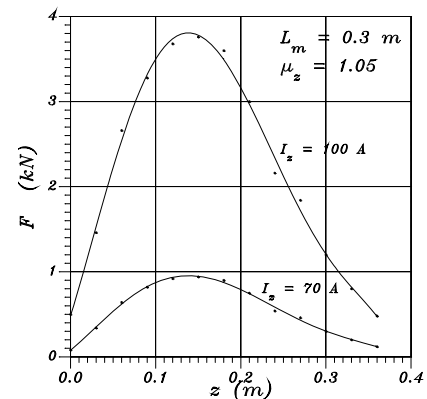
$$(11) \quad \vec{F} = \frac{dW}{dl} \vec{I}_1$$

gdzie:  $dW$  - zmiana energii pola magnetycznego spowodowana przemieszczeniem się elementu ferromagnetycznego,  $dl$  - przesunięcie matrycy.



Rys. 15. Przenikalność zastępcza  $\mu_z$  matrycy dla różnych współczynników upakowania  $\varepsilon$

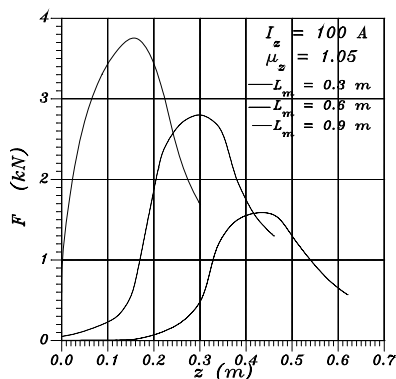
Dla znanej przenikalności magnetycznej matrycy i znanego rozkładu pola magnetycznego w przestrzeni roboczej filtra zostały wykonane obliczenia siły działającej ze strony pola magnetycznego na poruszającą się w nim matrycę ferromagnetyczną. Obliczenia wykonano dla trzech długości matrycy:  $L_m = 0,3$  m,  $L_m = 0,6$  m, i  $L_m = 0,9$  m, przy czym dla matrycy o długości 0,3 m jako parametr zmienny wprowadzono także wielkość prądu zasilania ( $I_z = 100$  A i  $I_z = 70$  A). Przyjęto, że długość uzwojenia elektromagnesu wynosi  $L = 0,3$  m. Rezultaty obliczeń przedstawiono na rysunkach 16 i 17.



Rys. 16. Siła działająca na matrycę ferromagnetyczną filtra o długości  $L_m = 0,3$  m. dla dwóch wartości prądów zasilania  $I_z$  elektromagnesu

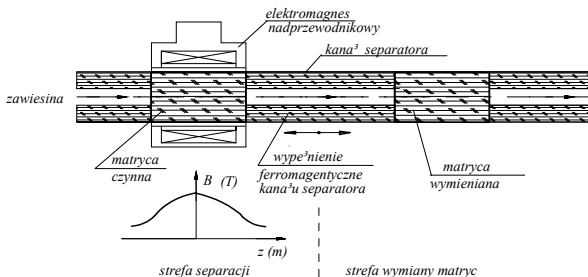
Wyniki przeprowadzonej analizy wykazały, że największa wartość siły pola magnetycznego działa na matrycę, gdy jeden z jej końców znajduje się w środku uzwojenia. Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki oznacza to, że uzwojenie elektromagnesu musi być konstrukcyjnie przystosowane do obciążenia tą siłą. W przypadku matrycy o wymiarach porównywalnych z długością uzwojenia, siła może osiągnąć znaczną wartość. Jej zmniejszenie możliwe jest bądź przez obniżenie prądu zasilania (nie jest możliwe wówczas uzyskanie znacznych indukcji pola magnetycznego) bądź przez

wydłużenie matrycy. To drugie rozwiązanie wydaje się być bardzo interesujące, ponieważ "długa" matryca w sposób zdecydowany pozwala na obniżenie wartości siły, ponadto umożliwia wymianę zapełnionej matrycy produktem magnetycznym na czystą poza obszarem pola magnetycznego.



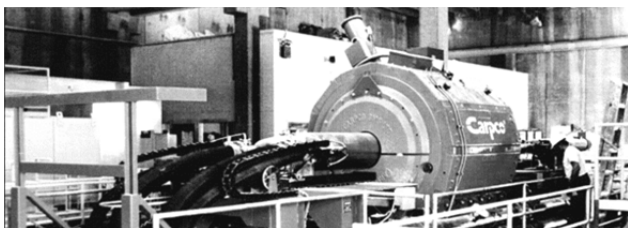
Rys. 17. Siła działająca na matryce o różnych długościach dla prądu zasilania  $I_z = 100$  A

Warunkiem niezbędnym jest dobór długości matrycy (musi być krotnością długości uzwojenia) oraz wypełnienie przestrzeni kanału między matrycami materiałem ferromagnetycznym o takich samych własnościach magnetycznych i takim samym współczynniku upakowania jak w matrycy. Tworzy się wówczas ośrodek magnetyczny jednorodny w całym obszarze działania pola magnetycznego. Praca separatora z „długą” matrycą gwarantuje minimalizację czasu martwego cyklu pracy filtra, a zatem umożliwia jego funkcjonowanie w ciągu technologicznym.

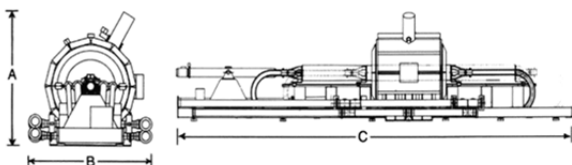


Rys. 18. Koncepcja pracy separatora z długą matrycą

a)



b)



Rys. 18. Widok (a) i schemat (b) nadprzewodnikowego separatora matrycowego pracującego w systemie „reciprocating canister”, firmy CARPCO SMS Ltd. [6]

Koncepcja pracy separatora z „długą” matrycą jest realizowana w praktyce np. przez firmę CARPCO zajmującą się m. in. oczyszczaniem kaolinu. System taki nazwano w literaturze systemem „reciprocating”. Praktycznie funkcjonujące takie rozwiązanie pokazano na rys. 19.

## Podsumowanie

W rozpatrywanym w pracy wysokogradientowym separatorze nadprzewodnikowym (HGMS) urządzeniu siły pola magnetycznego działają zarówno na poziomie mikro- jak i makroskopowym. Analiza sił w modelu mikroskopowym pozwala ocenić wpływ czynników na skuteczność ekstrakcji cząstek o określonych własnościach magnetycznych z zawiesiny.

W pracy przedstawiono jedynie wpływ indukcji pola magnetycznego na ruch cząstek zobrazowany ich torem. Wpływ innych czynników dyskutowany był m.in. w [3].

Model makroskopowy umożliwia teoretyczną ocenę siły występującej przy przemieszczaniu matrycy w polu magnetycznym. Znajomość tej siły umożliwia wykonanie odpowiedniej konstrukcji uzwojenia i jego mocowanie w kriostacie. Istotnym problemem jest minimalizacja siły, zwłaszcza w urządzeniu na skalę przemysłową. Rozwiązaniem wydaje się być praca z „długą” matrycą.

W sposób jednoznaczny wykazano, że najważniejszy parametr modelu, jakim jest współczynnik aktywności osadzania cząstek na powierzchni kolektorów matrycy, istotnie zależy od wartości indukcji pola magnetycznego. Zastosowanie silnych pól magnetycznych w rozważanej konstrukcji separatora stawia jednak określone wymagania odnośnie doboru materiału ferromagnetycznego, który stanowi wypełnienie matrycy separatora i jej konstrukcji.

Oprócz wzrostu skuteczności procesu separacji, ze wzrostem pola magnetycznego możliwe jest stosowanie większych prędkości przepływu zawiesiny, co zwiększa wydajność procesu.

**Autor:** prof.nz. 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

## 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.
- [4] Cieśla A., Garda B., Sykalski J.: *Shaping of Magnetic Field Distribution in a High Gradient Magnetic Filter*. Archiwum Elektrotechniki, Vol. LI, No 4, pp. 403 – 415, 2002.
- [5] Cieśla A.: *Superconductor Magnetic Filter: Industrial Construction*, Proc. Third International Conference Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMCO2000, Naęczów, 4 – 6 June 2000, pp. 174 – 182.
- [6] Bulletin (1996) *Bulletin No 9621 – 7KDP ©CARPCO, INC.*, 1996.