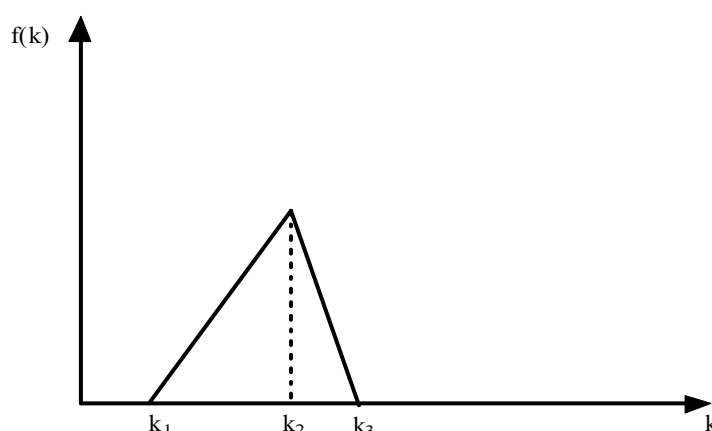


13

WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH FLOTOWNIKÓW PRZEPŁYWOWYCH WIELOKOMOROWYCH

13.1 WPROWADZENIE

Wyznaczanie charakterystyk statycznych procesu wzbogacania w maszynach flotacyjnych (przemysłowych) jest zagadnieniem trudnym ze względu na wpływ wielu parametrów na przebieg procesu. Parametrem, który uwzględnia wpływ wszystkich czynników jest współczynnik prędkości flotacji k ziaren. W określonych warunkach nadawę charakteryzuje charakterystyka gęstości rozkładu flotowalności $f(k)$. Wyznaczenie funkcji $f(k)$ realizowane jest pośrednio poprzez model matematyczny kinetyki $m(t)$ na podstawie wydzielanych w dyskretnych chwilach czasowych składników masy koncentratu. Powszechnie stosowanym podejściem jest przyjęcie postaci funkcyjnej modelu matematycznego wydzielania się masy koncentratu, dla różnych funkcji rozkładu. Temu zagadnieniu poświęcono wiele prac [1, 2, 3, 9, 10]. W pracach tych autorzy przyjmowali, że nadawę charakteryzuje ciągły lub dyskretny rozkład flotowalności ziaren. W pracy [7] zaproponowano trójkątny rozkład funkcji $f(k)$. Postać rozkładu trójkątnego przedstawiono na rys. 13.1.



Rys. 13.1 Rozkład flotowalności ziaren węgla $f(k)$ w kształcie trójkąta
gdzie: k_1 , k_2 , k_3 – parametry rozkładu trójkątnego

Parametry rozkładu flotowalności $f(k)$ można wyznaczyć na podstawie parametrów modelu matematycznego $m(t)$. Wynika to ze związku pomiędzy funkcją $f(t)$ oraz przebiegiem $m(t)$. Wydzielanie się masy koncentratu w czasie t jest zgodne ze wzorem:

$$m(t) = M \left(1 - \int_0^{\infty} f(k) e^{-k \cdot t} dk \right) \quad (13.1)$$

gdzie:

M – masa flotowalna nadawy.

Na podstawie badań [5, 6] stwierdzono, że w modelach kinetyki flotacji należy uwzględnić opóźnienie transportowe τ . Uwzględnienie tego parametru w modelu zapewnia najdokładniejsze odwzorowanie kinetyki flotacji. Parametry modelu matematycznego $m(t)$ wyznacza się korzystając z metody najmniejszych kwadratów na podstawie danych pomiarowych kinetyki flotacji cyklicznej.

Funkcję $f(t)$ wyznacza się ze wzoru (13.1) stosując odwrotne przekształcenie Laplace'a:

$$f(k) = L^{-1} \left\{ 1 - \frac{m(t)}{M} \right\} \quad (13.2)$$

gdzie:

$L^{-1} \{ \}$ – odwrotne przekształcenie Laplace'a.

13.2 MODEL MATEMATYCZNY WYDZIELANIA SIĘ MASY POPIOŁU W PROCESIE KINETYKI FLOTACJI

O jakości koncentratu, w dużym stopniu decyduje zawartość popiołu w koncentracie. Na podstawie eksperymentów flotacji cyklicznej wydzielania się masy koncentratu $m(t)$ można wyznaczyć także masę popiołu $m_a(t)$ w czasie t . Dysponując pomiarami masy $m(t)$, $m_a(t)$ oraz parametrami rozkładu frakcji $f(k)$ można określić zależność rozkładu zawartości popiołu w koncentracie a_k w funkcji współczynnika prędkości flotacji k .

$$m_a(t) = M_a - M \int_0^{\infty} f(k) a_k(k) e^{-k \cdot t} dk \quad (13.3)$$

gdzie:

M_a – masa popiołu części flotowalnej nadawy.

W pracy [8] autorzy wyznaczyli model matematyczny wydzielania się masy popiołu w czasie kinetyki flotacji cyklicznej przy różnych wartościach natężenia przepływu powietrza aeracyjnego V_p (przy czym $V_p = 1/3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$). Wpływ współczynnika prędkości flotacji k na zawartość popiołu w koncentracie $a_k(k)$ określono wielomianem drugiego stopnia o nieznanym trzech parametrach (x_1, x_2, x_3).

$$a_k(k) = (x_2 \cdot k^2 + x_1 \cdot k + x_0) \quad (13.4)$$

Parametry modelu wydzielania się masy popiołu $m_a(t)$ w czasie t otrzymuje się wyznaczając całkę (13.3) z uwzględnieniem zależności (13.4) i rozkładu $f(k)$.

Szczegółowy opis eksperymentów flotacji cyklicznej oraz dane pomiarowe wydzielania się masy koncentratu $m(t)$ i masy popiołu $m_a(t)$, wykorzystywane do określenia parametrów modeli matematycznych przedstawione zostały w pracy [5]. Wartości parametrów trójkątnego modelu rozkładu flotowalności wykorzystane w niniejszej pracy zaczerpnięto z [7]. Parametry modelu zawartości popiołu w koncentracie $a_k(k)$ podano w pracy [8].

13.3 CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE FLOTOWNIKA PRZEPŁYWOWEGO JEDNOKOMOROWEGO

Flotowniki przemysłowe są flotownikami przepływowymi. Wartości wychodu koncentratów z poszczególnych komór flotownika można określić na podstawie pomiarów parametrów jakościowych w stanie ustalonym.

Wychód koncentratu w stanie ustalonym jednokomorowego flotownika można przedstawić w postaci następującego wzoru [4, 11]:

$$W_K = \int_{k_1}^{k_3} \frac{\frac{k}{D_o}}{1 + \frac{k}{D_o}} f(k) dk \quad (13.5)$$

Zawartość popiołu w koncentracie można natomiast przedstawić wzorem:

$$A_K = \frac{\int_{k_1}^{k_3} \frac{\frac{k}{D_o}}{1 + \frac{k}{D_o}} a(k) f(k) dk}{\int_{k_1}^{k_3} \frac{\frac{k}{D_o}}{1 + \frac{k}{D_o}} f(k) dk} \quad (13.6)$$

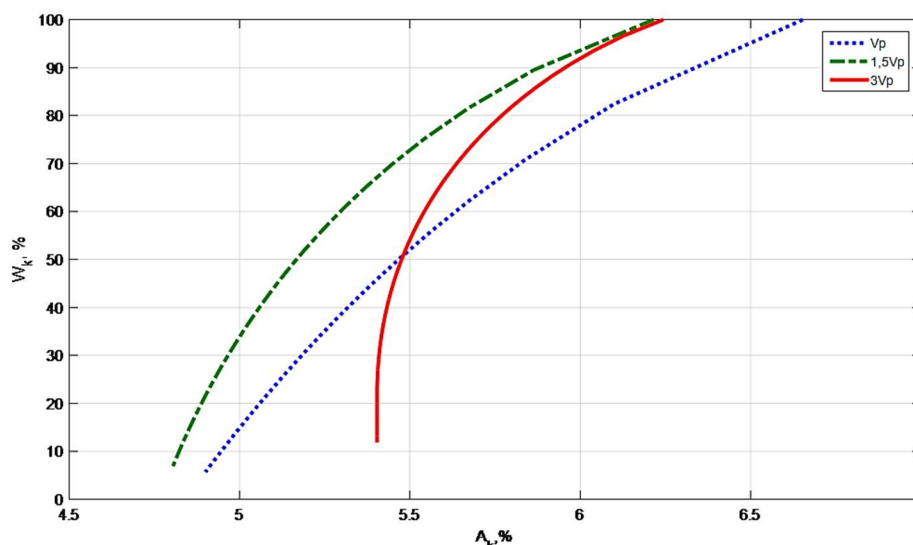
gdzie:

D_o – parametr charakteryzujący wpływ ziaren ze strefy odpadów, s^{-1} (jest odwrotnością średniego czasu przebywania ziaren w komorze flotownika T),

k – współczynnik prędkości flotacji, s^{-1} ,

k_1, k_3 – parametry trójkątnego rozkładu flotowalności $f(k)$.

Na rys. 13.2 przedstawiono wychód części flotowalnej jednokomorowego flotownika przepływowego w funkcji zawartości popiołu w koncentracie. Wyniki obliczeń na wykresach wartości wychodu odniesiono do części flotowalnej nadawy (100% wychodu odpowiada maksimum wyflotowanej masy).



Rys. 13.2 Wychód części flotowalnej jednokomorowego flotownika przepływowego w funkcji zawartości popiołu w koncentracie

Na podstawie rys. 13.2 można stwierdzić, że wychód części flotowalnej nadawy o zawartości popiołu rzędu 6% jest największy przy dawce powietrza 1,5 Vp i wynosi ponad 90%, a najmniejszy przy dawce Vp i wynosi około 80%. Dla zawartości popiołu poniżej 5,5% wychód koncentratu jest znacznie mniejszy i wpływ dawki powietrza jest nieco inny.

Otrzymane na podstawie badań symulacyjnych charakterystyki statyczne wychodu koncentratu i zawartości popiołu w koncentracie w zależności od zmian natężenia dopływu powietrza, są zbieżne do charakterystyk wyznaczonych na podstawie badań przeprowadzonych w warunkach przemysłowych.

13.4 CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE FLOTOWNIKA PRZEPŁYWOWEGO WIELOKOMOROWEGO

Wychód koncentratu w stanie ustalonym flotownika o L komorach można przedstawić w postaci następującego wzoru [4, 11]:

$$W_K = \int_{k_1}^{k_3} \left[\frac{(1 + \frac{k}{D_{oi}})^L - 1}{(1 + \frac{k}{D_{oi}})^L} \right] f(k) dk \quad (13.7)$$

Zawartość popiołu w koncentracie można natomiast przedstawić wzorem:

$$A_K = \frac{\int_{k_1}^{k_3} \left[\frac{(1 + \frac{k}{D_{oi}})^L - 1}{(1 + \frac{k}{D_{oi}})^L} \right] a(k) f(k) dk}{\int_{k_1}^{k_3} \left[\frac{(1 + \frac{k}{D_{oi}})^L - 1}{(1 + \frac{k}{D_{oi}})^L} \right] f(k) dk} \quad (13.8)$$

gdzie:

L – liczba komór flotownika,

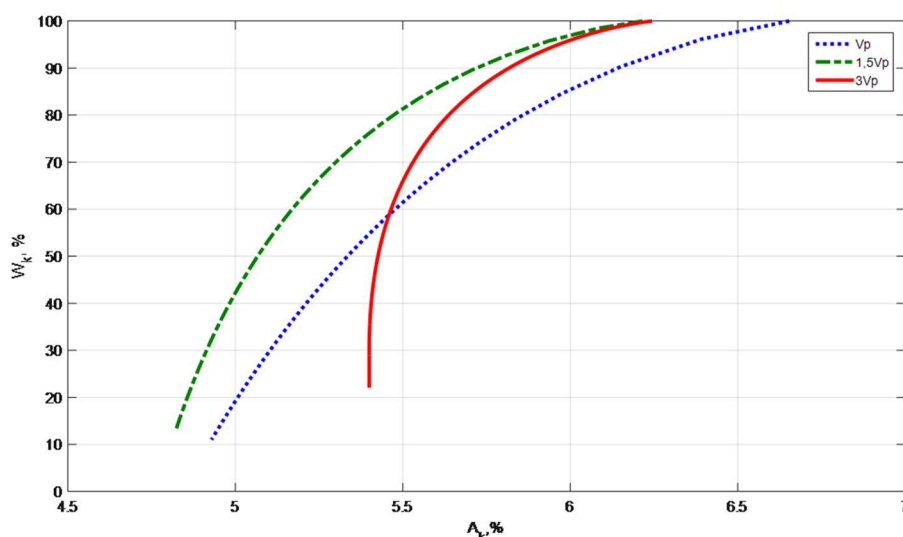
D_{oi} – parametr charakteryzujący wypływ ziaren ze strefy odpadów i -tej komory, s^{-1} ,
(jest odwrotnością średniego czasu przebywania ziaren w komorze flotownika T_i),

T_i – średni czas przebywania ziaren w komorach flotownika, $T_i = \frac{V_{ai}}{v_{oi}}$, s,

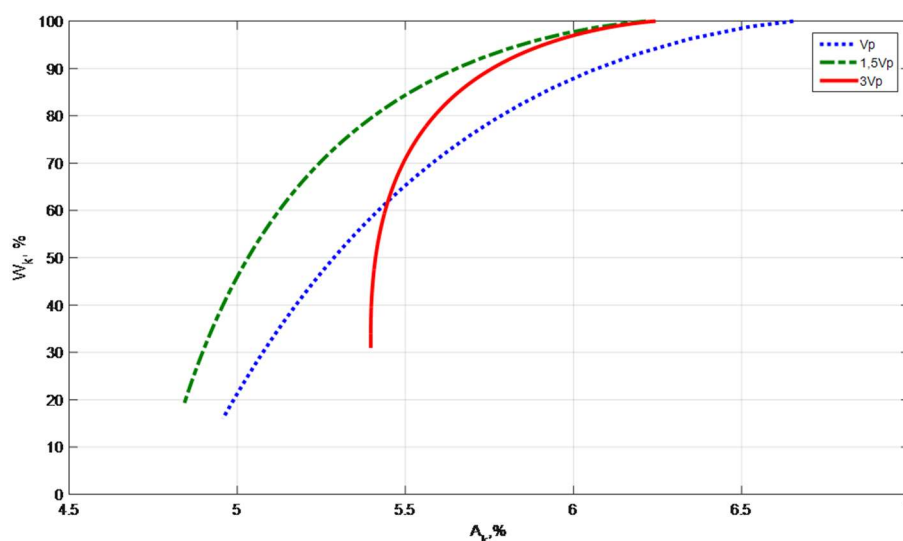
V_{ai} – objętość czynna mętów w i -tej komorze, m^3 ,

v_{oi} – natężenie sumaryczne wypływu mętów z i -tej komory, m^3/s .

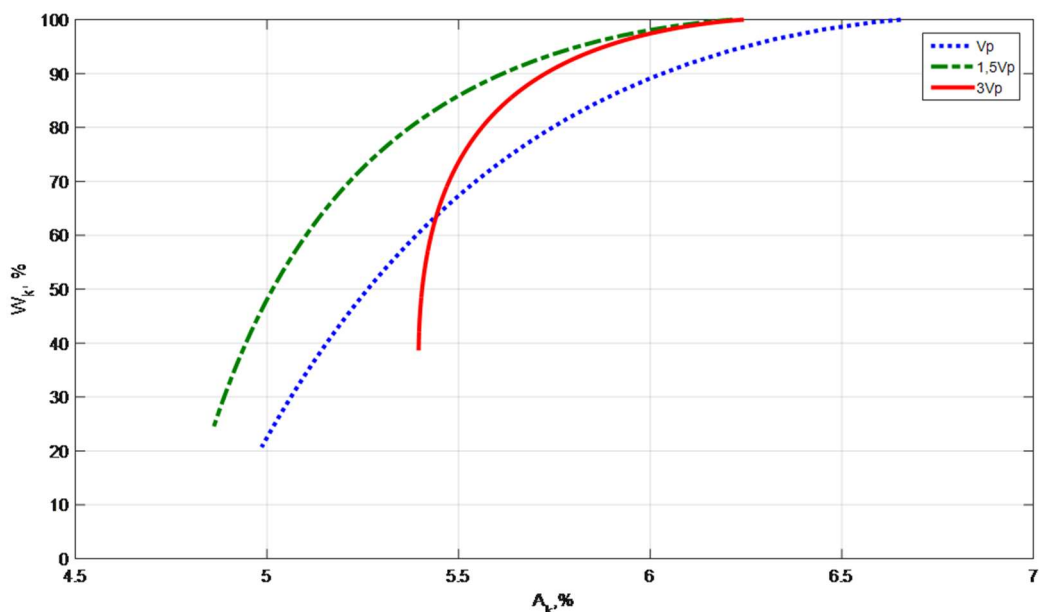
Dla przyjętej nadawy przedstawiono charakterystyki statyczne parametrów ilościowo-jakościowych w układzie flotowników dwu, trój i czterokomorowego o strukturze szeregowej (rys. 13.3 do rys. 13.5).



Rys. 13.3 Wychód części flotowalnej dwukomorowego flotownika przepływowego w funkcji zawartości popiołu w koncentracie

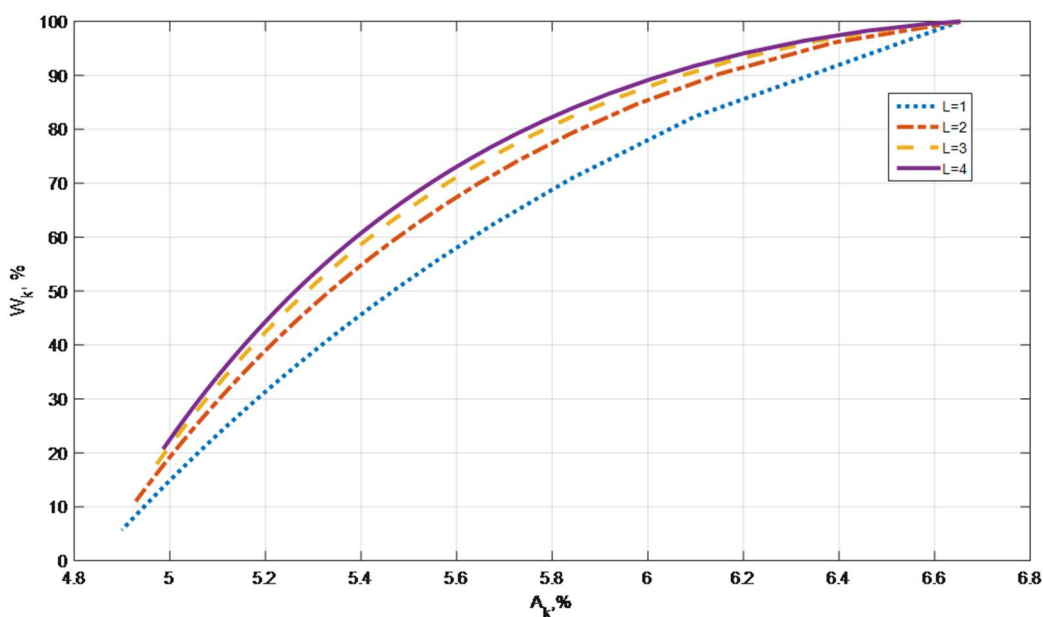


Rys. 13.4 Wychód części flotowalnej trójkomorowego flotownika przepływowego w funkcji zawartości popiołu w koncentracie

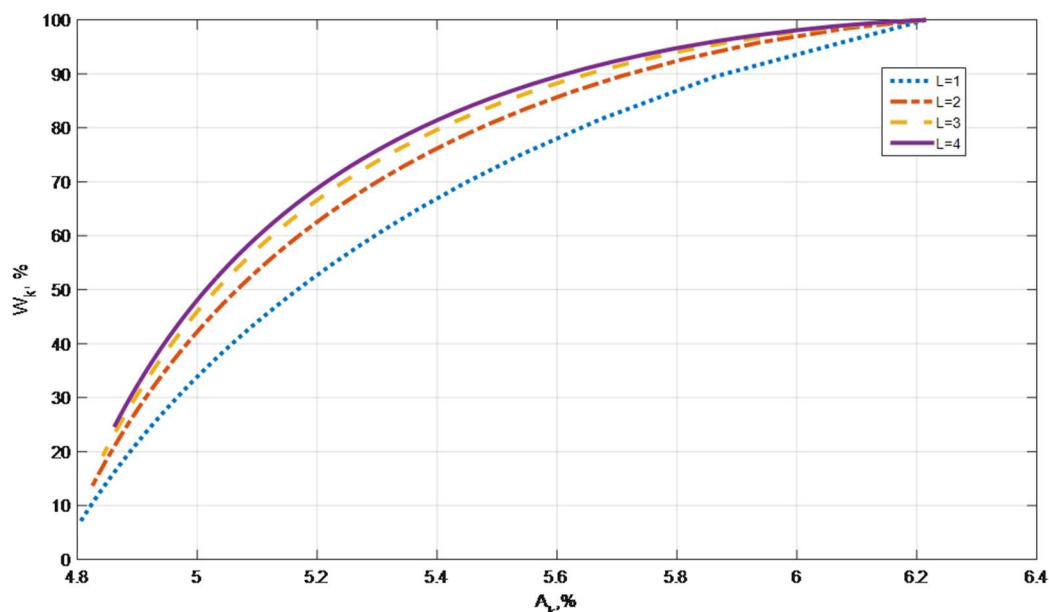


Rys. 13.5 Wychód części flotowalnej czterekomorowego flotownika przepływowego w funkcji zawartości popiołu w koncentracie

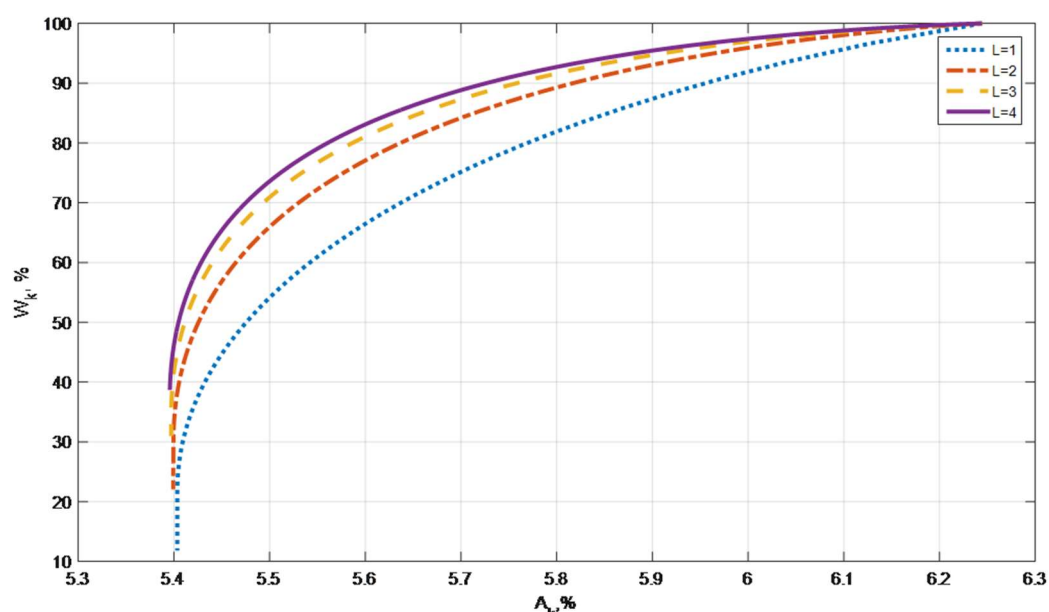
Na rys. 13.6 do rys. 13.8 przedstawiono porównanie charakterystyk statycznych flotowników przepływowych wielokomorowych w zależności od liczby komór L flotownika oraz wartości natężenia powietrza do aeracji.



Rys. 13.6 Wychód części flotowalnej flotownika przepływowego w funkcji zawartości popiołu w koncentracie, dla wartości V_p



Rys. 13.7 Wychód części flotowalnej flotownika przepływowego w funkcji zawartości popiołu w koncentracie, dla wartości 1,5Vp



Rys. 13.8 Wychód części flotowalnej flotownika przepływowego w funkcji zawartości popiołu w koncentracie, dla wartości 3Vp

13.5 PODSUMOWANIE

W teorii i technice symulacji procesu flotacji węgla szerokie zastosowanie znajduje funkcja gęstości rozkładu flotowalności ziaren. Charakterystyki tego typu mogą być wykorzystane przy projektowaniu układów technologicznych flotacji. Z przeprowadzonych badań nad modelami matematycznymi rozkładu współczynnika flotowalności ziaren badanych próbek węgla wynika, że stosowanie rozkładu trójkątnego ma uzasadnienie nie tylko statystyczne, ale jest zgodne z sensem fizycznym (ziarna nadawy węgla nie mogą mieć nieograniczonego współczynnika prędkości flotacji). Dla przyjętego rozkładu flotowalności można

wyznaczyć rozkład zawartości popiołu w zależności od współczynnika prędkości flotacji. W pracy, na podstawie tych zależności, wyznaczono charakterystyki statyczne jednokomorowego i wielokomorowego flotownika przepływowego.

Z analizy tych charakterystyk (rys. 13.2 do rys. 13.5) wynika, że zależność wychodu koncentratu i zawartości popiołu w koncentracie od natężenia przepływu powietrza do aeracji posiada ekstremum. Zwiększenie natężenia przepływu powietrza do aeracji powyżej określonej wartości spowoduje zmniejszenie wychodu koncentratu. Tym samym można ustalić maksimum wychodu przy określonej zawartości popiołu oraz minimum zawartości popiołu w koncentracie przy określonym wychodzie koncentratu. Należy zaznaczyć, że przy pewnej wartości natężenia przepływu powietrza do aeracji występuje ograniczenie dotyczące uzyskania niskich zawartości popiołu w koncentracie (rys. 13.8). Zatem wartość natężenia powietrza aeracyjnego należy określać w zależności od rodzaju nadawy.

Można zauważyć (rys. 13.6 do rys. 13.8), że zwiększanie liczby komór ma wpływ na przyrost wychodu koncentratu. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wymagań produkcji koncentratu o niskiej zawartości popiołu np. 5%. W tym przypadku różnica pomiędzy wychodem flotownika czterokomorowego i jednokomorowego wynosi 10% przy natężeniu przepływu o wartości V_p (rys. 13.6) oraz 15% przy natężeniu o wartości $1,5V_p$ (rys. 13.7). Jak wynika z charakterystyk przedstawionych na rys. 8 dla wartości natężenia przepływu równego $3V_p$, dla przyjętej nadawy, nie można uzyskać zawartości popiołu w koncentracie równego 5%.

Analizując wartości wychodu koncentratu w zależności od liczby komór flotownika (dla tej samej zawartości popiołu) można zauważyć, że przyrost wartości wychodu z każdą dodatkową komorą jest mniejszy. Jest to oczywiste dla flotownika przepływowego, gdyż nadawa do każdej kolejnej komory flotownika jest odpadem z poprzedniej. Jednak przyrost wartości wychodu znacznie się zmniejsza dla flotownika czterokomorowego. Zatem ze względu na rachunek ekonomiczny celowym wydaje się zastosowanie flotownika o maksymalnej liczbie 3 komór.

Znajomość charakterystyk gęstości rozkładu frakcji wraz z rozkładem zawartości popiołu umożliwi lepszą ocenę zjawisk zachodzących w procesie wzbogacania. Wyznaczone na podstawie tych modeli charakterystyki statyczne flotowników jedno i wielokomorowych mogą być wykorzystywane w projektowaniu systemów sterowania procesu flotacji kopalni.

LITERATURA

1. M. Brożek, A. Młynarczykowska. *Kinetyka flotacji*. Kraków: Wydawnictwo IGSMiE PAN, 2009.
2. M.A. Fischera, M.W. Chudacek. „Batch cell flotation models – A Review.” *Minerals Engineering*, 5(1), pp. 41-54, 1991.
3. T. Imaizumi, T. Inoue. „Kinetic considerations of froth flotation,” Proc. 6th International Mineral Processing Congress, Cannes, 1963, pp. 581-593.

4. K. Kalinowski. *Seminarium Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa. Sterowanie procesu flotacji węgla*. Skrypt uczelniany nr 1598. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1991.
5. K. Kalinowski, R. Kaula. „Wpływ natężenia powietrza aeracyjnego na rozkład flotowalności w eksperymentach flotacji cyklicznej węgla.” *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo*, z. 225, pp. 111-118, 1995.
6. K. Kalinowski, R. Kaula. „Transport delay in a mathematical models of batch coal flotation kinetics.” *Archives of Mining Sciences*, vol. 40, pp. 339-349, 1995.
7. K. Kalinowski, R. Kaula. „Verification of flotation kinetics model for triangular distribution of density function of flotability of coal particles.” *Archives of Mining Sciences*, vol. 58, pp. 1279-1287, 2013.
8. K. Kalinowski, R. Kaula. „Determination of static characteristics of flow flotation machines based on experiments of the kinetics of the batch coal flotation.” *Archives of Mining Sciences*, vol. 61, pp. 47-57, 2016.
9. K. Kalinowski, T. Tumidajski. „Przegląd Modeli matematycznych kinetyki flotacji cyklicznej.” *Zeszyty Naukowe AGH, s. Górnictwo*, z. 3, 1995.
10. E.T. Woodburn, B.K. Loveday. „The effect of variable residence time on the performance of a flotation systems.” *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 65, pp. 612-628, 1965.
11. J.C. Yingling. „Parameter and configuration of flotation circuits, part I. A review of prior work.” *International Journal of Mineral Processing*, no. 38, pp. 21-40, 1993.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

dr hab. inż. Roman Kaula

Politechnika Śląska
Wydział Górnictwa i Geologii
Katedra Elektryfikacji
i Automatyzacji Górnictwa
ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Polska
e-mail: roman.kaula@polsl.pl

dr hab. inż. Krystian Kalinowski

Politechnika Śląska
Wydział Górnictwa i Geologii
Katedra Elektryfikacji
i Automatyzacji Górnictwa
ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Polska
e-mail: Krystian.kalinowski@polsl.pl

WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH FLOTOWNIKÓW PRZEPŁYWOWYCH WIELOKOMOROWYCH

Streszczenie: Wyznaczanie charakterystyk statycznych procesu wzbogacania w przemysłowych maszynach flotacyjnych jest zagadnieniem trudnym ze względu na wpływ wielu parametrów na przebieg procesu. Przyjmuje się, że parametrem który zawiera informacje o czynnikach wpływających na proces jest współczynnik prędkości flotacji k ziaren, charakteryzujący się określonym rozkładem flotowalności ziaren $f(k)$. Funkcję tego typu uzyskuje się na podstawie przebiegu kinetyki wydzielania się masy składników nadawy w procesie flotacji cyklicznej. Wyznaczenie funkcji $f(k)$ realizowane jest pośrednio poprzez model matematyczny przebiegu kinetyki flotacji $m(t)$. Wyznaczone parametry modelu kinetyki są równocześnie parametrami modelu funkcji gęstości rozkładu flotowalności ziaren węgla. Na podstawie wcześniejszych prac autorzy wykazali, że model rozkładu trójkątnego funkcji $f(k)$ dobrze charakteryzuje niejednorodność nadawy. Korzystając z rozkładu flotowalności ziaren można wyznaczyć rozkład zawartości popiołu w zależności od zmian współczynnika prędkości flotacji. Na podstawie tych zależności można wyznaczyć charakterystyki statyczne flotownika przepływowego. W artykule wyznaczono charakterystyki statyczne jednokomorowego i wielokomorowego flotownika przepływowego. Otrzymane na podstawie badań symulacyjnych charakterystyki statyczne wychodu koncentratu i zawartości popiołu w koncentracie w zależności od zmian natężenia dopływu powietrza, są zbliżone do charakterystyk wyznaczonych, przez autorów, na podstawie badań flotowników przemysłowych. Znajomość charakterystyk gęstości rozkładu frakcji wraz z rozkładem zawartości popiołu umożliwi lepszą ocenę zjawisk zachodzących w procesie wzbogacania. Wyznaczone na podstawie tych modeli charakterystyki statyczne przepływowych flotowników jedno i wielokomorowych mogą być wykorzystywane w projektowaniu systemów sterowania procesu flotacji kopalni.

Słowa kluczowe: modele kinetyki flotacji, współczynnik prędkości flotacji, funkcja gęstości rozkładu flotowalności ziaren węgla, charakterystyki statyczne flotowników przepływowych

DETERMINATION OF STATIC CHARACTERISTICS OF MULTICHAMBER FLOW FLOTATION MACHINES

Abstract: Determining the static characteristics of the enrichment process in industrial flotation machines is a difficult problem because of the influence of many parameters on the process. It is assumed that a parameter which contains information about the factors affecting the process is the velocity coefficient k of the flotation particles. This parameter is characterized by distribution of the particles flotability $f(k)$. The function of this type is obtained based on the course of the kinetics of the mass feed components in the batch flotation process. Determining a function $f(k)$ is carried out indirectly by a mathematical model based on the course of flotation kinetics $m(t)$. The determined parameters of the kinetics model are also the parameters of the model of the distribution density function of the coal particles flotability. Based on previous works has been shown that the feed heterogeneity can be well characterized by the model of the triangular distribution function $f(k)$. Using the distribution of the particles flotability it can determine the distribution of the ash content depending on changes of the coefficient of the flotation velocity. On the basis of these dependencies can be determined the static characteristics of the flow flotation machine. The static characteristics of single and multi-chamber of the flow flotation machine in the paper have been presented. Obtained on the basis of simulation the static characteristics of the concentrate recovery and ash content in the concentrate depending on changes in the intensity of the air are similar to the characteristics determined by the authors based on the research of the industrial flotation machines. Knowledge of the characteristics of the density of the fractions distribution together with the distribution of ash content will allow a better assessment of the phenomena occurring in the enrichment process. The static characteristics of the single and multi-chamber flotation flow machines determined on the basis of these models can be used in the design of systems of the process control of the minerals flotation.

Key words: models of the kinetics flotation, coefficient of the flotation velocity, density function of the distribution of the coal particles flotability, static characteristics of the flow flotation machines