

Zagadnienie monitorowania parametrów koncentratu flotacyjnego w warunkach niepełnej informacji pomiarowej

W krajowych obiektach przemysłowych procesu flotacji węgla kamiennego dostępne pomiarowo są wyłącznie parametry ilościowe nadawy i jakościowe odpadów flotacyjnych. Natomiast brakuje ciągłej kontroli parametrów ilościowo-jakościowych koncentratu. W artykule przedstawiono wyniki wstępnego rozeznania w zakresie ciągłego monitorowania parametrów koncentratu w warunkach niepełnej informacji pomiarowej. W niniejszym artykule rachunek błędów nie jest dyskutowany.

WSTĘP

Flotacja należy do fizykochemicznych metod wzbogacania surowców mineralnych. W przypadku węgla kamiennych wzbogacanie metodą flotacji stosowane jest dla nadawy składającej się z ziaren mniejszych od 0,5 mm (max <1 mm). Z punktu widzenia automatyzowania procesu, flotacja węgla jest wielowymiarowym, dynamicznym nieliniowym obiektem sterowania. Podstawowymi wielkościami wejściowymi procesu flotacji są: natężenie przepływu nadawy – Q_n o zawartości popiołu A_n i koncentracji części stałych w nadawie K_{cs} , natężenie przepływu odczynnika flotacyjnego V_o , natężenie przepływu powietrza do aeracji mętów Q_a oraz poziom zawiesziny w komorach flotownika h . Wielkościami wyjściowymi są: ilość (wychód) koncentratu W_k , zawartość popiołu w koncentracie A_k , ilość (wychód) odpadów W_o , zawartość popiołu w odpadach A_o .



Rys. 1. Proces flotacji węgla jako obiekt sterowania

W przemysłowych układach sterowania procesem flotacji węgla kamiennego możliwe jest zainstalowanie przyrządów pomiarowych mierzących parametry ilościowe i jakościowe nadawy, koncentratu i odpadów [1, 2, 6-8, 11, 13, 15]. Pełne oprzyrządowanie obiektu umożliwia ciągłą kontrolę jakości prowadzenia procesu. W typowych krajowych układach pomiarowo dostępne są parametry ilościowe nadawy oraz jakościowe odpadów flotacyjnych. Problemem jest brak możliwości ciągłej kontroli zawartości popiołu w nadawie i w koncentracie.

W krajowych rozwiązaniach, układy automatycznego sterowania sprowadzają się do lokalnych układów automatycznej stabilizacji wybranych sygnałów sterujących: h , Q_a , V_o , a o ich wartościach zadanych decyduje operator procesu. W większości krajowych systemów sterowania, strategia sterowania opiera się głównie na wiedzy operatora procesu, który podejmuje decyzje o zmianach wartości sygnałów sterujących (w tym głównie ilości odczynnika flotacyjnego) na podstawie obserwacji piany flotacyjnej, wskazań gęstościomierza nadawy i popiołomierza odpadów.

1. ILOŚĆ KONCENTRATU

Równania bilansu mas i popiołów w nadawie, koncentracie i odpadach flotacyjnych można zapisać w postaci:

$$W_n = W_k + W_o \quad (1a)$$

$$A_n W_n = A_k W_k + A_o W_o \quad (1b)$$

gdzie:

W_i – ilość (wychód) odpowiednio: nadawy, koncentratu, odpadów ($i = n, k, o$),

A_i – zawartość popiołu odpowiednio: w nadawie, koncentracie, odpadach ($i = n, k, o$).

Na podstawie równań (1a i 1b) bilansu mas i zawartości popiołów w nadawie i produktach flotacji ilość koncentratu może być obliczona z równania:

$$W_k = \frac{A_n - A_o}{A_k - A_o} \cdot W_n \quad (2a)$$

Przyjmując, że $W_n = 100$ [%], równanie opisujące ilość (wychód) koncentratu można zapisać w postaci:

$$W_{k\%} = \frac{A_n - A_o}{A_k - A_o} \cdot 100\% \quad (2b)$$

Jak widać równania 2a, 2b wiążą ilość koncentratu z parametrami jakościowymi nadawy i produktów flotacji. Ilość (wychód) koncentratu, obliczany z zależności 2b, przyjmuje się najczęściej jako miarę flotowalności mułu [15].

2. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI ILOŚCI KONCENTRATU NA ZMIANĘ PARAMETRÓW JAKOŚCIOWYCH NADAWY, KONCENTRATU I ODPADÓW FLOTACYJNYCH

Ocena możliwości wykorzystania równania 2b do obliczania ilości koncentratu w pierwszym rzędzie wymaga sprawdzenia wpływu poszczególnych składowych równania na wartość wielkości szukanej, przy czym należy pamiętać, że poszczególne składowe równania 2b są ze sobą powiązane.

Wrażliwość jest miarą wpływu zmiennych objaśniających na zmienną objaśnianą. Analiza wrażliwości pozwala sprawdzić wrażliwość modelu (równanie 2b) na parametry wejściowe [14]. W rozważanym przypadku zmiennymi objaśniającymi są: A_n , A_k i A_o , natomiast zmienną objaśnianą jest $W_{k\%}$. Celem przeprowadzonej analizy wrażliwości jest wykazanie, która zmienna objaśniająca ma największy, a która najmniejszy wpływ na oszacowanie ilości koncentratu obliczanej zgodnie ze wzorem 2b.

Analizę wrażliwości ograniczono do wyznaczenia wrażliwości cząstkowej [12], a uzyskane wyniki przedstawiono poniżej.

$$\left| \frac{\partial W_{k\%}}{\partial A_n} \right| = \left| \frac{A_k - A_o}{(A_k - A_o)^2} \cdot 100 \right| \quad (3)$$

$$\left| \frac{\partial W_{k\%}}{\partial A_k} \right| = \left| \frac{A_o - A_n}{(A_k - A_o)^2} \cdot 100 \right| \quad (4)$$

$$\left| \frac{\partial W_{k\%}}{\partial A_o} \right| = \left| \frac{A_n - A_k}{(A_k - A_o)^2} \cdot 100 \right| \quad (5)$$

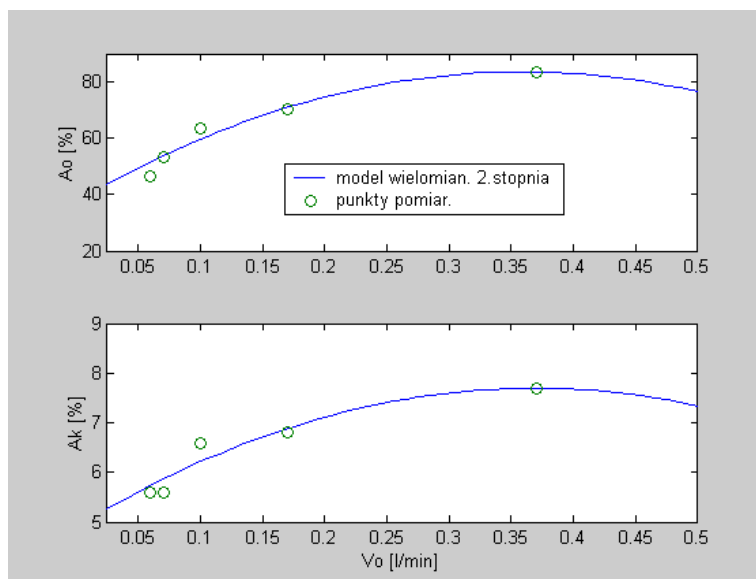
Na podstawie równań 3, 4, 5 można stwierdzić, że najmniejszy wpływ na zmienną objaśnianą $W_{k\%}$ ma A_o , natomiast znaczny wpływ mają: A_n oraz A_k . Tak się niefortunnie składa, że krajowe obiekty przemysłowe nie są wyposażone w aparaturę pomiarową przeznaczoną do ciągłej kontroli obu tych parametrów. Jediną możliwością oceny zawartości popiołu w nadawie i koncentracie jest laboratoryjne oznaczenie próbek pobieranych z poszczególnych strug.

3. WYZNACZANIE ILOŚCI KONCENTRATU PRZY NIEPEŁNEJ INFORMACJI POMIAROWEJ

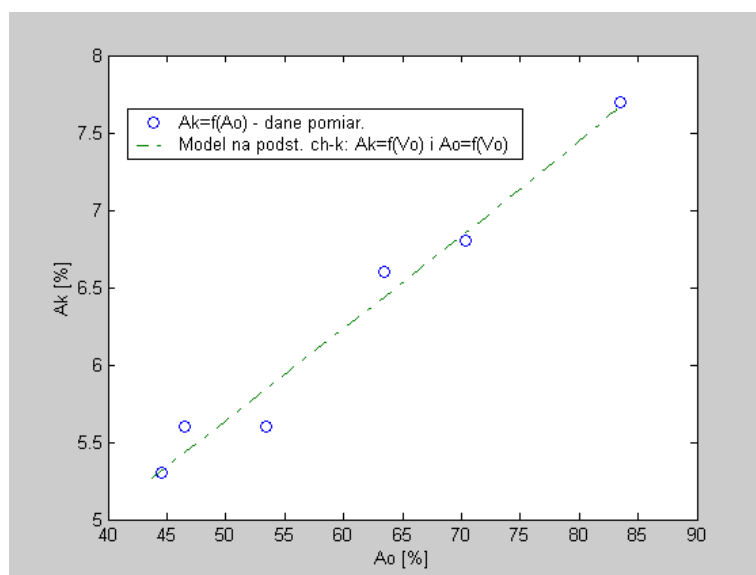
Następny etap analizy powinien sprowadzać się do rozeznania w zakresie możliwości uzupełnienia brakujących pomiarów lub zastąpienia ich równaniami (modelami) empirycznymi wiążącymi niemierzalną szukaną wielkość z parametrem pomiarowo dostępnym. Zadanie to można zrealizować w oparciu o wyniki badań identyfikacyjnych.

Próbie rozwiązania sformułowanego problemu przeprowadzono w oparciu o analizę charakterystyk statycznych procesu flotacji, opisujących zależność zawartości popiołu w odpadach i koncentracie od natężenia przepływu dozowanego odczynnika flotacyjnego, który jest głównym sygnałem sterującym decydującym o jakości prowadzenia procesu. W rozważaniach dotyczących omawianego zagadnienia wykorzystano wyniki eksperymentów identyfikacyjnych przeprowadzonych na obiekcie przemysłowym flotacji KWK Jas-Mos [3, 10].

Wyniki badań identyfikacyjnych pokazują, że zależności statyczne $A_o = f(V_o)$ i $A_k = f(V_o)$ mają charakter ekstremalny. Modelem, którym dostatecznie dokładnie opisać można te zależności jest wielomian drugiego stopnia [3-5, 10].



Rys. 2. Zależności zawartości popiołu w odpadach i koncentracji od natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego



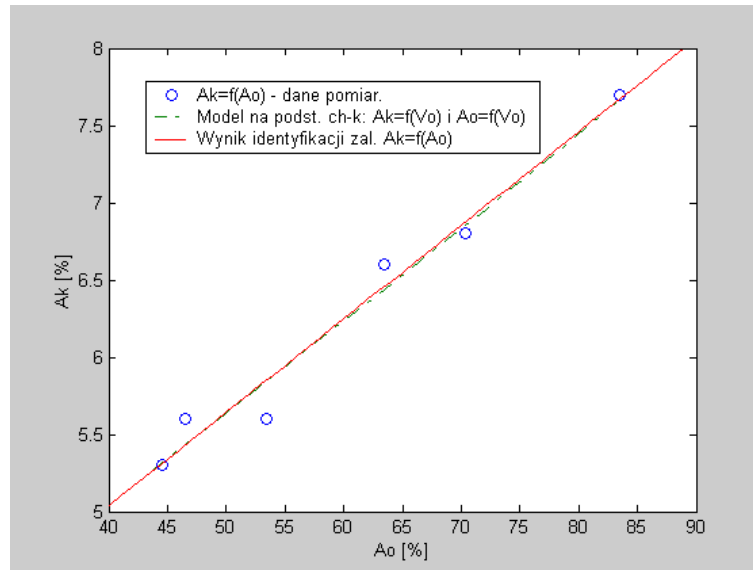
Rys. 3. Zależności zawartości popiołu w koncentracji od zawartości popiołu w odpadach przy zmianach natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego

Jak pokazują wyniki badań, zawartość popiołu w nadawie okresowo jest stała [3-5, 9, 10]. W związku z tym okresowe oznaczenie próbek pobieranych z nadawy może w ograniczonym stopniu stanowić ekwiwalent ciągłego pomiaru tego parametru.

Należy zatem we wstępnych rozważaniach skupić się nad możliwością wyznaczenia zawartości popiołu w koncentracji w oparciu o empiryczny model, który wiązać będzie szukaną wielkość z mierzoną on-line zawartością popiołu w odpadach flotacyjnych. Jest to możliwe przy wykorzystaniu modeli charakterystyk statycznych $A_o = f(V_o)$ i $A_k = f(V_o)$.

Zagadnienie to sprowadza się do utworzenia zależności $A_k = f(A_o)$ z charakterystyk statycznych $A_o = f(V_o)$

i $A_k = f(V_o)$, gdzie parametrem będzie natężenie przepływu odczynnika flotacyjnego (przy $Q_n = \text{const}$, $K_{cs} = \text{const}$, $A_n = \text{const}$). Tak wyznaczona zależność $A_k = f(A_o)$ mówi o tym, że przy danych stałych parametrach nadawy (w warunkach ustalonych parametrów nadawy) dozowanie określonej ilości odczynnika flotacyjnego skutkować będzie uzyskaniem odpadów oraz koncentratu o określonych zawartościach popiołu. Tak więc, przy stałych określonych parametrach nadawy, przy danej wartości natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego i zmierzonej zawartości popiołu w odpadach można określić zawartość popiołu w koncentracji flotacyjnym. Przykładową zależność $A_k = f(A_o)$ przedstawiono na rys. 3.



Rys. 4. Model zależności zawartości popiołu w koncentracie od zawartości popiołu w odpadach przy zmianach natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego

Jak widać na rysunku 3 przekształcenie modeli charakterystyk statycznych $A_o = f(V_o)$ i $A_k = f(V_o)$ do postaci $A_k = f(A_o)$ pokazuje, że zależność ta (w rozważanym przypadku) jest zbliżona do liniowej. Aproksymacja zależności $A_k = f(A_o)$ w oparciu o dane eksperymentalne dała zbliżone rezultaty – modelem najlepiej dopasowanym do danych empirycznych jest funkcja liniowa postaci:

$$A_k = d_0 + d_1 \cdot A_o \quad (6)$$

Obliczony model (równanie 6) przedstawiono graficznie na rysunku 4. Można zauważyć, że model wyznaczony w oparciu o dane pomiarowe w zasadzie pokrywa się z modelem uzyskanym w wyniku przekształcenia modeli charakterystyk statycznych: $A_o = f(V_o)$ i $A_k = f(V_o)$.

Przy obliczaniu ilości koncentratu na podstawie zależności 2b ważnym zagadnieniem jest przedział zmian zawartości popiołu w koncentracie. Jak widać na zamieszczonych wykresach, przedział zmian może być niewielki. Pomimo faktu dużej wrażliwości równania 2b na zmiany A_k należy rozpatrzyć, czy konieczne jest poszukiwanie równania wiążącego zawartość popiołu w koncentracie od zawartości popiołu w odpadach, czy też dostateczną dokładność oszacowania ilości koncentratu uzyska się wprowadzając do równania 2b średnią arytmetyczną zawartości popiołu w koncentracie, obliczoną dla danej serii pomiarowej. W tym celu obliczono ilość koncentratu zgodnie ze wzorem:

$$W_{i\%}^* = \frac{A_n - A_o}{A_{k\text{ avg}} - A_o} \cdot 100\% \quad (7)$$

gdzie:

$A_{k\text{ avg}}$ – średnia arytmetyczna serii pomiarowej zawartości popiołu w koncentracie w pełnym zakresie badanych zmian V_o dla analizowanego przykładu.

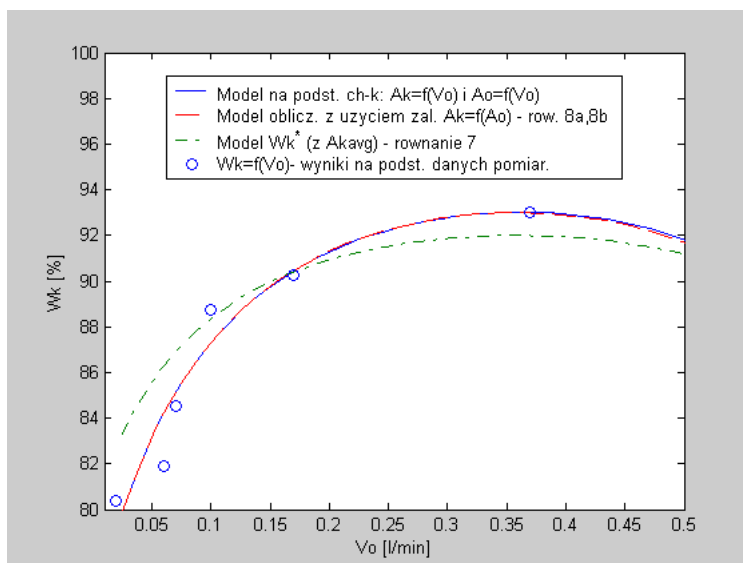
Okazuje się, że ze względu na dużą wrażliwość równania 2b na zmiany A_k obliczone wartości ilości koncentratu w oparciu o wzór 7 znacząco odbiegają od wartości wyznaczonych na podstawie danych pomiarowych. Natomiast wyznaczanie ilości koncentratu przy wykorzystaniu modelu zależności $A_k = f(A_o)$ daje dokładniejsze wyniki. Tak więc ilość koncentratu dla rozważanego przypadku należy oszacować korzystając z równań 8a i 8b.

$$A_k(A_o) = d_0 + d_1 \cdot A_o \quad (8a)$$

$$W_{k\%} = \frac{A_n - A_o}{A_k(A_o) - A_o} \cdot 100 \quad (8b)$$

Obliczone charakterystyki ilości koncentratu od natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego zestawiono graficznie na rysunku 5.

Jak widać na rysunku 5, model ilości koncentratu w funkcji natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego obliczony za pomocą równania 7 z użyciem wartości średniej $A_{k\text{ avg}}$ ($W_{k\%}^*$) znacząco odbiega zarówno od punktów obliczonych na podstawie danych pomiarowych, jak i od modelu wyznaczonego z charakterystyk statycznych, a także od modelu opisanego równaniami 8a i 8b. Zauważyć również można, że model ilości koncentratu opisany równaniami 8a i 8b jest zbliżony do zależności $W_k = f(V_o)$ wyznaczonej w oparciu o charakterystyki statyczne $A_o = f(V_o)$, $A_k = f(V_o)$ i dostatecznie dokładnie opisuje omawianą zależność.



Rys. 5. Zależność ilości koncentratu od natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego

Należy stwierdzić, że szacowanie ilości koncentratu z wykorzystaniem wyłącznie pomiaru ciągłego zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych jest możliwe.

4. MONITOROWANIE PARAMETRÓW KONCENTRATU W WARUNKACH NIEPEŁNEJ INFORMACJI POMIAROWEJ

Przedstawione powyżej rozważania dotyczą szacowania jakości i ilości koncentratu (równania 8a i 8b) przy stałości parametrów nadawy. Jak wynika z badań, położenie charakterystyk statycznych $A_o = f(V_o)$ i $A_o = f(V_o)$ zmienia się w zależności od zakłóceń – losowych zmian parametrów nadawy [3, 4, 10]. Jednakże w czasie prowadzenia przemysłowego procesu flotacji występują okresy stałości parametrów nadawy. Wówczas dla celu szacowania jakości i ilości koncentratu obowiązuje, obliczony dla tych warunków, model zależności $A_k = f(A_o)$. Natomiast zmiana parametrów nadawy wymaga ponownego przeliczenia modelu zależności zawartości popiołu w koncentracie od zawartości popiołu w odpadach przy zmianach natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego. Wykorzystując oznaczenia próbek pobieranych z nadawy i koncentratu można uzupełnić brakujące sygnały, niezbędne do obliczenia jakości i ilości koncentratu, przy czym po ustaleniu się parametrów nadawy nie jest konieczna znajomość charakterystyk statycznych w pełnym zakresie zmian natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego. W zasadzie wystarczy na podstawie np. trzech próbek (pobranych dla różnych wartości V_o) dokonać aproksymacji za-

leżności $A_k = f(A_o)$, przy przyjętym wskaźniku oceny dopasowania modelu do danych eksperymentalnych.

Zatem, po zmianie wartości parametrów nadawy, szacowanie jakości i ilości koncentratu przy różnych wartościach natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego jest możliwe i nie wymaga zainstalowania dodatkowej aparatury pomiarowej. Ponadto gromadzenie modeli wyznaczonych dla różnych parametrów nadawy, daje możliwość identyfikowania zmian parametrów tych modeli od zmian parametrów nadawy. Dzięki tej wiedzy o procesie zyskuje się możliwość ciągłego szacowania jakości i ilości koncentratu.

Ideę wyznaczania zawartości popiołu w koncentracie i ilości (wychodu) koncentratu w warunkach niepełnej informacji pomiarowej przedstawia rys. 6.

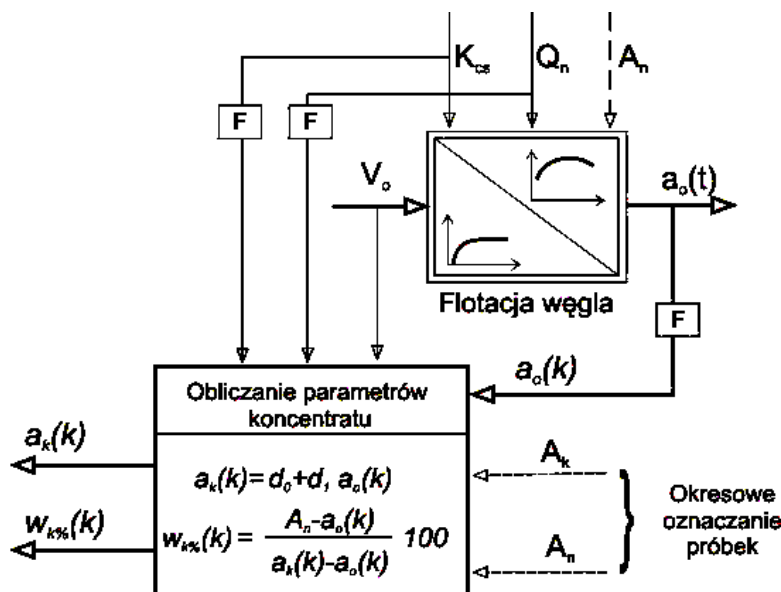
Powszechnie stosowane równania bilansujące proces flotacji (2) są równaniami statycznymi. Wprowadzając do równania 8a i 8b, mierzone w dyskretnych chwilach czasu wartości sygnału z popiolomierza odpadów można napisać równania na chwilową przybliżoną zawartość popiołu w koncentracie oraz wartość ilości koncentratu wyrażoną w procentach ilości nadawy przy zmianach natężenia odczynnika flotacyjnego. Równania te obowiązują przy stałych parametrach nadawy i można je przedstawić w postaci:

$$a_k(k) = d_0 + d_1 \cdot a_o(k)\% \quad (9a)$$

$$w_{k\%}(k) = \frac{(A_n - a_o(k))}{(a_k(k) - a_o(k))} \cdot 100\% \quad (9b)$$

gdzie:

$k=1, 2, \dots, t/T_s, T_s$ – okres próbkowania.



Rys. 6. Metoda obliczania zawartości popiołu oraz ilości koncentratu flotacyjnego w warunkach niepełnej informacji pomiarowej, F- filtr dolnoprzepustowy

PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionych wyników można sformułować następujące wnioski:

- w warunkach stałości parametrów nadawy ($Q_n = \text{const}$, $K_{cs} = \text{const}$, $A_n = \text{const}$) istnieje możliwość wyznaczenia parametrów koncentratu przy niepełnej informacji pomiarowej, poprzez uzupełnienie brakujących sygnałów równaniami empirycznymi wiążącymi niemierzalne szukane wielkości z pomiarowo dostępnym sygnałem z popiołomierza odpadów,
- prezentowane empiryczne zależności (rów. 8a, 8b oraz rów. 9a, 9b) przeznaczone są do obliczania zawartości popiołu w koncentracie oraz ilości koncentratu przy zmianach natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego.

Przedstawione rozważania i wyniki obliczeń mają charakter wstępny i stanowią podstawę do dalszych badań i analiz w tym zakresie.

Literatura

1. Barbagallo J.K., Quemard D.: Automatic Process Control of Fine Coal Flotation. Proceedings of CoalPrep 89 Conference, Lexington, Kentucky, 1989, pp. 215-233.
2. Cierpisz S.: Automatyizacja procesów przeróbki mechanicznej węgla, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1980.
3. Cierpisz S., Gröbner L., Joostberens J.: Identyfikacja procesu flotacji węgla, X Konferencja APPK Szczyrk 2004.
4. Cierpisz S., Joostberens J.: Characteristics of the coal floatation process in control circuit. IX Balkan Mineral Processing Congress (IX BMPC), Istanbul 2001.
5. Cierpisz S., Joostberens J.: Simulation of fuzzy control of coal flotation, IFAC Workshop – MMM 2006 “Automation in Mining, Mineral and Metal Industry, Cracow-Poland 2006, pp. 210-214.

6. Cierpisz S., Inoue T.: Automatyizacja i kontrola procesów przeróbki węgla – przegląd zastosowań, XII Międzynarodowy Kongres Przeróbki Węgla, Kraków, V 1994, str. 7-18.
7. Clarkson C., Hornsby D., Walker D.: Automatic Flotation Control using On-Stream Ash Analysis, Coal Preparation Vol. 12, 1993, pp 41-64.
8. Jenden H., Morby P., Toop A.: Automatyizacja kontrola wzbogacania mialu węglowego, XII Międzynarodowy Kongres Przeróbki Węgla, Kraków, CPPGSMoE PAN 1994, str. 119-127.
9. Joostberens J.: Badania własności dynamicznych procesu flotacji węgla jako obiektu sterowania, VIII APPK, Szczyrk 2002, str. 103-112.
10. Joostberens J.: Automatyizacja regulacja procesu flotacji węgla, Praca Doktorska (niepublikowana), Gliwice 2006.
11. Kalinowski K.: Sterowanie procesu flotacji węgla, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1991.
12. Kaula R.: Analiza wrażliwości wielowymiarowego obiektu sterowania na przykładzie procesu flotacji węgla, VIII Konferencja APPK, Szczyrk 2002, str. 125-135.
13. Laurila M.: The use of on-line Ash Monitoring System in Local Control Applications. Coal Preparation, vol.14, 1994, pp. 81-91.
14. Niederliński A., Kościński J., Ogonowski Z.: Regulacja adaptacyjna, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1995.
15. Sablik J.: Flotacja węgla kamiennych, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 1998.

Recenzent: dr inż. Roman Kaula