



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2023.1>

Od maszyny do systemu mechatronicznego na przykładzie flotacji mułów węglowych – przegląd doświadczeń Łukasiewicz-IMN

Krzysztof Szczepaniak – Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Metali Nieżelaznych

Tomasz Zachariasz – Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Metali Nieżelaznych

Waldemar Mijał – Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Metali Nieżelaznych

Streszczenie: Flotacja mułów węglowych, oprócz wzbogacania (koncentrat o wysokiej zawartości składnika użytecznego i niskiej zawartości popiołu od 4÷10%), zamyka i oczyszcza obieg wodny kopalni, stanowiąc ważny element ochrony środowiska naturalnego. Duże flotowniki pracujące jako niezależne jednostki produkcyjne wyposażone w układy stabilizacji parametrów technologicznych (system mechatroniczny) gwarantują prawidłowy przebieg procesu, jak i wysoką jakość produktów. Urządzenia te mogą pracować w warunkach zdalnego sterowania, co stanowi zachętę do prowadzenia modernizacji flotacji w zakładach wzbogacania węgla. Poprawę skuteczności flotacji mułów węglowych i obniżenie kosztów procesu wzbogacania węgla można osiągnąć stosując korzystne zmiany w technologii oraz wprowadzając nowe konstrukcje maszyn flotacyjnych, wyposażone w nowoczesne elementy automatyki i sterowania (sensory, akтуatory, sterowniki PLC) oraz systemy mechatroniczne. Podstawowym celem wzbogacania mułów węglowych jest utrzymanie na stałym (zadanym) poziomie wartości zapozielenia odpadów flotacyjnych, poprzez ciągłe, automatyczne korygowanie wartości istotnych parametrów procesu. System sterowania optymalizującego procesem flotacji może być stosowany zarówno dla wzbogacania węgla, jak i innych surowców mineralnych.

Słowa kluczowe: flotacja, maszyna flotacyjna, system sterowania, system mechatroniczny

From a machine to a mechatronic system on the example of coal sludge flotation - a review of Łukasiewicz-IMN experience

Abstract: Flotation of coal sludge, apart from enrichment (concentrate of a high content of a useful component and a low ash content of 4 - 10%), closes and cleans the mine's water circuit, constituting an important part of environmental protection. Large flotation machines operating as independent production units equipped with stabilization systems for technological parameters (mechatronic system) guarantee the correct process and high quality of products. These devices can operate under remote control conditions, which is an incentive to modernize flotation in coal preparation plants. Improving the effectiveness of coal sludge flotation and reducing the costs of the coal enrichment process can be achieved by applying favorable changes in technology and introducing new designs of flotation machines equipped with state-of-the-art automation and control components (sensors, actuators, PLC controllers) and mechatronic systems. The main purpose of coal sludge enrichment is to maintain the ash content in flotation tailings at a constant (set) level through continuous, automatic correction of the values of important process parameters. The control system optimizing the flotation process can be used both for the enrichment of coal as well as other minerals.

Keywords: flotation, flotation machine, control system, mechatronic system

1. Wprowadzenie – charakterystyka procesu flotacji

W trakcie wzbogacania grawitacyjnego węgla powstaje wodna zawiesina mułu węglowego wymagająca rozdzielenia na fazę stałą i wodę zwracaną do procesu. Wpływ na przebieg procesów wodno-mułowatych mają skały towarzyszące pokładom węgla [1]. Flotacja węgla stanowi bardzo ważne ogniwo tego procesu. Pozwala na wydzielenie z mułów koncentratu o niskiej zawartości popiołu, który zależy między innymi od własności surowca i konstrukcji maszyny. Odzysk substancji palnej kształtuje się na poziomie 90%. Nie ma więc technicznych przeszkód w szerokim stosowaniu flotacji do wzbogacania

mułów węglowych. Dla węgla wzbogacanie flotacyjne prowadzi się dla najdrobniejszych klas ziarnowych, głównie poniżej 0,5 mm, korzystnie 0 – 0,2 mm. Zawartość popiołu w mułach węglowych wynosi zwykle od kilkunastu do ok. 40%. Flotacja mułów węglowych, oprócz wzbogacania (koncentrat o wysokiej zawartości składnika użytecznego i niskiej zawartości popiołu od 4÷10%), zamyka i oczyszcza obieg wodny kopalni, stanowiąc ważny element ochrony środowiska naturalnego.

Do wzbogacania mułów węglowych metodą flotacji stosuje się maszyny flotacyjne. Najczęściej stosuje się maszyny pneumo-mechaniczne typu IZ, maszyny „starego” typu oraz typu IF, maszyny „nowego” typu.

Technologia flotacji danego mułu węglowego powinna zapewniać optymalną flotowalność tego mułu w skali przemysłowej, dlatego musi uwzględniać czynniki warunkujące taką flotowalność [2]. Czynniki te to stopień uwęglenia węgla, skład, sposób występowania i oddziaływanie substancji mineralnych na aktywność flotacyjną węgla, stopień rozdrobnienia substancji mineralnej i węglowej, stopień uwolnienia substancji organicznej od mineralnej, skład granulometryczny mułów węglowych, koncentracja części stałych w zawieszynie, jakość, ilość i sposób wprowadzania odczynników flotacyjnych, sposób napowietrzania zawiesziny flotacyjnej, czynniki typu mechanicznego, czas flotacji i inne [2].

2. Maszyny flotacyjne korytowe typu IZ

W 1966 roku opracowano konstrukcję flotownika o pojemności komory 1,1 m³ – IZ 1, a w drugim etapie o pojemności komory 3,0 m³ – IZ-3. Zakłady Mechaniczne ZAMET wykonały dokumentację techniczną oraz prototypy przemysłowe tych flotowników, które otrzymały oznaczenie IZ (Instytut – Zamet) [3]. W 1969 r. w Zakładzie opracowano konstrukcję flotownika IZ-5 o pojemności komory 5 m³. W latach 1973÷1974 opracowano konstrukcję flotownika IZ-12 o pojemności komory 12 m³ [3]. W latach siedemdziesiątych flotownik IZ-12 znalazł powszechne zastosowanie w modernizowanych i budowanych zakładach wzbogacania węgla w polskim przemyśle górnictwa węglowego [2]. Maszyny te wyposażano w ręczne systemy sterowania i regulacji poziomu pulpy flotacyjnej (grubości piany) (rys. 1).



Rys. 1. Ręczny system sterowania i regulacji poziomu pulpy flotacyjnej (grubości piany)



W toku rozwoju elektromechaniki, pneumatyki rozpoczęto procesy automatyzacji pracy maszyn, regulacji i sterowania pracą maszyn IZ [4] oraz ograniczenia zużycia energii poprzez zastosowanie nowoczesnych aeratorów typu WD [5-9].

3. Maszyny flotacyjne cylindryczne typu IF

Wzrost objętości flotowników wpływa korzystnie na koszty eksploatacji i możliwości zdalnego sterowania procesem. Okrągły kształt komory oraz nowatorska konstrukcja aeratora zapewniają lepsze warunki hydrodynamiczne procesu i wpływają na poprawę podstawowych wskaźników flotacji oraz obniżenie kosztów zużycia energii [10]. Duże flotowniki pracujące jako niezależne jednostki produkcyjne wyposażone w układy stabilizacji parametrów technologicznych gwarantują prawidłowy przebieg procesu, jak i wysoką jakość produktów. Maszyny te mogą pracować w warunkach zdalnego sterowania, co stanowi zachętę do prowadzenia modernizacji flotacji w zakładach wzbogacania węgla. Dalszym krokiem jest praca w układzie stabilizacji jakości koncentratu i odpadów.

Duże objętości komory wymagały dobrego rozeznania przepływów we flotowniku w celu wykorzystania jego objętości do flotacji, mieszania zawiesiny. Ważnym elementem jest tu spokojna powierzchnia cieczy pod pianą jako elementu płynnego i stabilnego odbioru koncentratu. Innym zagadnieniem dla przemysłu węglowego jest zmiana lokalizacji obiektów flotacyjnych z najwyższego poziomu budynku płuczki do poziomu gruntu, gdzie nie występują ograniczenia budowlane.

Podstawowe cechy konstrukcji wielkogabarytowych cylindrycznych maszyn flotacyjnych typu IF:

- poprawa warunków hydrodynamicznych,
- wysoka efektywność flotacji,
- poprawa aeracji,
- poprawa warunków transportu piany,
- automatyzacja i stabilizacja procesu,
- niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne,
- dostosowanie konstrukcji do potrzeb indywidualnego odbiorcy i specyfiki konkretnego procesu flotacji.

Zmiany konstrukcji maszyny flotacyjnej objęły przede wszystkim nowatorskie opracowanie nowego:

- efektywnego aeratora, wysokiej wydajności mieszania i napowietrzania zawiesiny, pulpy flotacyjnej,
- systemu wprowadzenia nadawy do komory flotacyjnej [11],
- systemu odbioru koncentratu, piany flotacyjnej,
- systemu odprowadzenia odpadów flotacyjnych.

Przykład nowoczesnej wielkogabarytowej jednokomorowej maszyny flotacyjnej typu IF [12, 13] przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Największa maszyna flotacyjna w Polsce, IF-100W

Wyposażenie flotowników typu IF:

- system automatycznej kontroli i regulacji poziomu pulpy,
- system automatycznego pomiaru i regulacji ilości powietrza technologicznego,
- przepływomierz indukcyjny nadawy flotacyjnej,
- system automatycznego dozowania odczynników flotacyjnych,
- system automatycznej regulacji stopnia zapopielenia odpadów dla flotacji węgla.

4. Elementy elektroniki, automatyki, kontroli, sterowania

Poprawę skuteczności flotacji mułów węglowych i obniżenie kosztów procesu wzbogacania węgla można osiągnąć stosując korzystne zmiany w technologii oraz wprowadzając nowe konstrukcje maszyn flotacyjnych wyposażone w nowoczesne elementy automatyki i sterowania, systemy mechatroniczne [14, 15]. Przykładem takiego rozwiązania był flotownik pracujący w KWK Jas-Mos (zdjęcie na rysunku 2 dowodzi, że takie rozwiązanie znalazło zastosowanie w praktyce).

4.1. Sensory

Do pomiaru nadawy kierowanej do flotacji stosuje się przepływomierze elektromagnetyczne oraz gęstościomierze izotopowe [16]. Instalowane są one na rurociągu nadawczym w rozmiarze odpowiednim do instalacji (np. DN 250). Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe urządzenia pomiarowe.



Rys. 3. Przepływomierz elektromagnetyczny i gęstościomierz izotopowy [17]

Układ pomiaru poziomym z czujnikiem ultradźwiękowym kontroluje grubość piany flotacyjnej [18]. Odpowiednio skalibrowany pomiar odległości informuje o chwilowej grubości piany, czyli wymiarze od poziomu cieczy w komorze maszyny do krawędzi komory, którą mogłaby się przelewać do rynny odbioru flotokonzentratu. Czujnik ultradźwiękowy zabudowany jest na szczycie rury pływaka. Układ przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Czujnik ultradźwiękowy odległości z rurą pływaka

Przepływomierz powietrza technologicznego kontroluje, mierzy ilość dozowanego powietrza do procesu [18]. Pomiar przepływu metodą wirową wykorzystywany jest w wielu branżach przemysłu do przepływu objętościowego cieczy, gazów i par. Przepływomierze wirowe charakteryzują się bardzo dobrą liniowością wskazań, są nieczułe na zmiany temperatury i ciśnienia, posiadają wyjście analogowe 4÷20 mA i cyfrowe (nie wymaga przetwarzania sygnału). Przepływomierz przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Przepływomierz wirowy powietrza technologicznego

Kolejnym sensorem zastosowanym do kontroli procesu technologicznego jest popiołomierz optyczny [16]. Jest przeznaczony do ciągłego pomiaru zawartości popiołu w produktach flotacji węgla kamiennego. Pomiary mogą być realizowane bezpośrednio na przelewach koncentratów, jak i korytach odpadów w maszynach flotacyjnych. Wyniki pomiaru mogą być bezpośrednio wykorzystane do celów automatycznej regulacji procesu flotacji. Przykładowy popiołomierz przedstawiono poniżej (rys. 6).



Rys. 6. Popiołomierz optyczny MPOF2 [19]

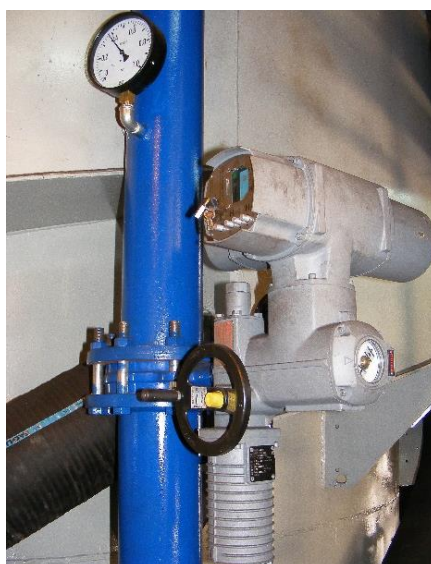
W systemie zastosowano również czujnik ciśnienia powietrza technologicznego zabudowany na kolektorze dolotowym. Informuje on o pracy dmuchawy i wymaganym sprężu powietrza dozowanego do procesu [18]. Przykładowy czujnik do pomiaru ciśnienia powietrza w kolektorze przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Czujnik ciśnienia powietrza [20]

4.2. Aktuatory

Rolę aktuatorów w instalacji zautomatyzowanej maszyny do flotacji pełnią przepustnice z napędami „auma” oraz przemiennik częstotliwości (falownik) [19] z silnikiem elektrycznym napędu wirnika aeratora. Przepustnice sterowane poprzez sterownik PLC zmieniają stopień otwarcia, przez co wpływają bezpośrednio na przepływ medium, jakim są powietrze technologiczne oraz odpad flotacyjny. Przepustnica powietrza zainstalowana jest na kolektorze pionowym doprowadzającym powietrze do pulpy flotacyjnej poprzez wał i wirnik aeratora. Przepustnica odpadu zabudowana jest pod dnem maszyny na rurociągu odpadu, którym z centralnej części komory wypływa odpad w wyniku ciśnienia słupa pulpy flotacyjnej wypełniającej komorę maszyny. Przykład przepustnicy przedstawiono na rysunku 8.



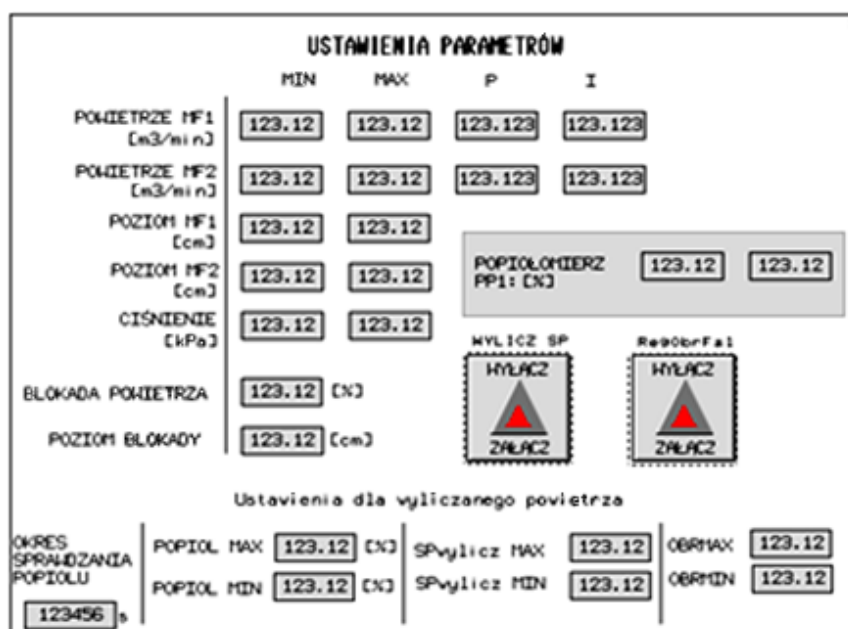
Rys. 8. Przepustnica z napędem [19]

Falownik sterujący obrotami silnika poprzez zmianę częstotliwości napięcia zabudowany jest w szafie AKPiA (Aparatury Kontrolno-Pomiarowej i Automatyki). Steruje prędkością obrotową odpowiednio do sygnału ze sterownika PLC, zgodnie z zaimplementowanym modelem sterowania.

5. System mechatroniczny – czyli optymalizacja flotacji mulów węglowych

Celem systemu mechatronicznego we flotacji mulów węglowych jest optymalne sterowanie maszyną dla osiągnięcia optymalnych, korzystnych efektów ekonomiczno-technologicznych. Do realizacji tego celu wykorzystano nowoczesną maszynę flotacyjną wyposażoną w napędy mechaniczne (np. silnik-przekładnia pasowa, wał), szereg sensorów, aktuatorów oraz sterownik PLC, do którego zaimplementowano specjalistyczne oprogramowanie [20, 21]. Sterownik PLC to komputer przemysłowy z modułowymi komponentami zaprojektowanymi do automatyzacji niestandardowych procesów sterowania. Używany do sterowania silnikami, napędami, wyłącznikami automatycznymi i innymi maszynami. Sterownik, do którego podpięte są wszystkie sygnały z sensorów i aktuatorów realizuje wszystkie funkcje, modele sterowania maszyną, procesem.

Opracowany system optymalizacji procesu flotacji mulów węglowych polega na dostosowaniu bieżących wartości parametrów flotacji do zmieniających się warunków wejściowych procesu. Podstawowym celem wzbogacania mulów węglowych jest utrzymanie na stałym (zadany) poziomie zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych, poprzez ciągłe, automatyczne korygowanie wartości istotnych parametrów procesu. Na stopień zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych najintensywniej wpływają zmiany ilości powietrza technologicznego dostarczanego do procesu oraz prędkości obwodowej wirnika aeratora. Opracowano układ regulacji nadążnej, w którym wartość zadana powietrza jest optymalizowana w celu uzyskania żądanej zawartości popiołu w odpadach. W układzie tym powietrze jest główną wartością regulującą „popiół”, natomiast obroty są wartością pomocniczą i ich zmiana następuje w przypadku, gdy zmiany powietrza w zadanym zakresie nie przynoszą pożądanego wpływu na wielkość zawartości popiołu w odpadach. Algorytm realizuje funkcję zwiększania lub zmniejszania wartości zadanej powietrza w określonych granicach, natomiast poza tymi granicami zwiększa lub zmniejsza zadaną wartość obrotów silnika. W celu swobodnej ingerencji w nastawy algorytmu opracowany został panel ustawień parametrów programu (rys. 9).

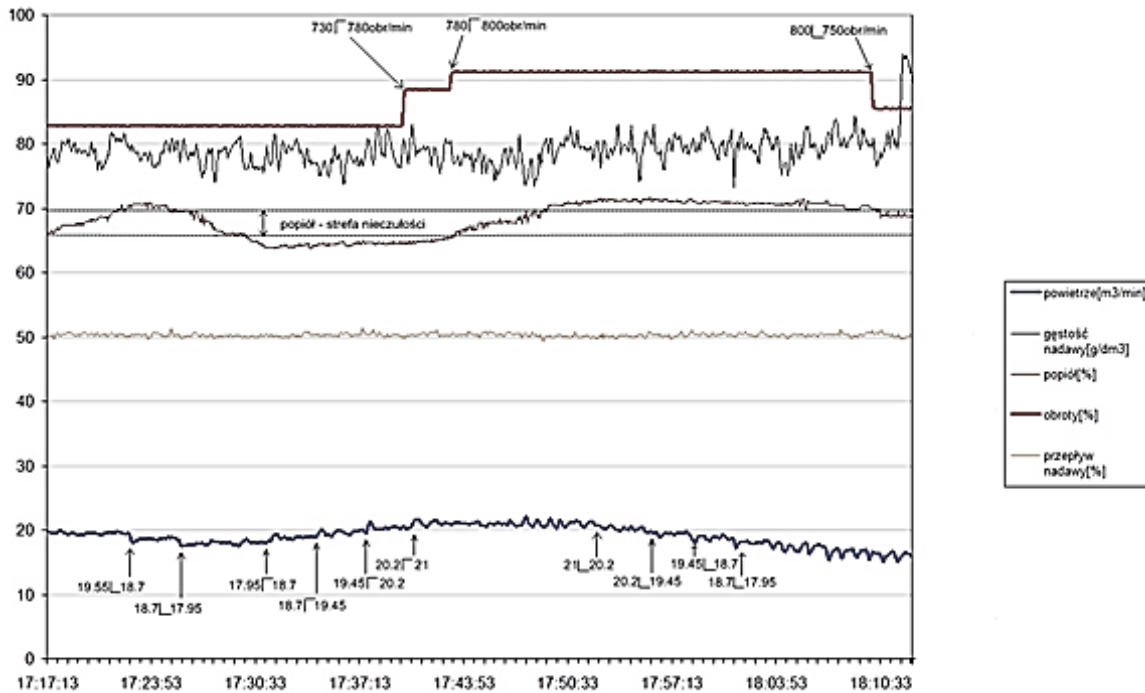


Rys. 9. Teoretyczny widok panelu ustawień parametrów programu [20, 21]

Z pulpitu możliwa jest ingerencja w następujące parametry algorytmu:

- Ts – okres sprawdzania wartości popiołu w odpadach,
- PTG – POPIOL MAX – wartość górnego progu tolerancji,
- PTD – POPIOL MIN – wartość dolnego progu tolerancji,
- SPwyliczMAX – wartość maksymalna dodawanego powietrza,
- SPwyliczMIN – wartość minimalna odejmowanego powietrza,
- OBRMAX – wartość maksymalna dodawanych obrotów,
- OBRMIN – wartość minimalna odejmowanych obrotów.

Zaimplementowany w sterowniku PLC układ regulacji jest uaktywniany za pomocą przycisków, które umożliwiają włączenie i wyłączenie układu regulacji nadążnej lub włączenie funkcji sterowania każdą z wartości zadanych (powietrze, obroty) z osobna. Graficzną rejestrację pracy systemu mechatronicznego, sterowania procesem technologicznym poprzez sterowanie maszyną flotacyjną przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Teoretyczny widok panelu ustawień parametrów programu [20, 21]

System mechatroniczny, czyli maszyna, sensory, akulatory, sterownik PLC z oprogramowaniem dąży do takiego stanu, aby zawartość popiołu w odpadach mieściła się w granicach między dolnym i górnym progiem zadanej tolerancji popiołu. System realizuje zadane funkcje optymalizujące proces technologiczny, a w sytuacji zidentyfikowanych przekroczeń reaguje zmianą parametrów i/lub sygnalizacją stanów alarmowych.



6. Podsumowanie

Flotacja mułów węglowych, oprócz wzbogacania (koncentrat o wysokiej zawartości składnika użytecznego i niskiej zawartości popiołu od 4÷10%), zamyka i oczyszcza obieg wodny kopalni, stanowiąc ważny element ochrony środowiska naturalnego.

Duże flotowniki pracujące jako niezależne jednostki produkcyjne wyposażone w układy stabilizacji parametrów technologicznych (system mechatroniczny), gwarantują prawidłowy przebieg procesu, jak i wysoką jakość produktów. Urządzenia te mogą pracować w warunkach zdalnego sterowania, co stanowi zachętę do prowadzenia modernizacji flotacji w zakładach wzbogacania węgla.

Poprawę skuteczności flotacji mułów węglowych i obniżenie kosztów procesu wzbogacania węgla można osiągnąć stosując korzystne zmiany w technologii oraz wprowadzając nowe konstrukcje maszyn flotacyjnych wyposażone w nowoczesne elementy automatyki i sterowania (sensory, akulatory, sterowniki PLC) systemy mechatroniczne.

Podstawowym celem wzbogacania mułów węglowych jest utrzymanie na stałym (zadanym) poziomie zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych, poprzez ciągłe, automatyczne korygowanie wartości istotnych parametrów procesu.

System sterowania optymalizującego proces flotacji może być stosowany zarówno dla wzbogacania węgla, jak i może być podstawą systemu wzbogacania innych surowców mineralnych.

Literatura

1. Nowak Z.: Gospodarka wodno-mułowa w zakładach przeróbki mechanicznej węgla. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1982
2. Sablik J.: Flotacja węgla kamiennych, Wydawnictwo GiG, Katowice 1998
3. Wieniewski A., Myczkowski Z.: Osiągnięcia i udział w rozwoju przeróbki surowców mineralnych i odpadów Instytutu Metali Nieżelaznych w Gliwicach, Inżynieria Mineralna, Z. 2(40), Wyd. Polskiego Towarzystwa Przeróbki Kopalni, Kraków, 2017, s. 15-24
4. Blaschke S., Blaschke W.: Technika wzbogacania węgla, AGH skrypty uczelniane 1048, wydanie drugie zmienione, Kraków 1986
5. Zachariasz T., Łuczak R., Szczerba E.: Możliwość zastosowania aeratorów typu WD w maszynach flotacyjnych serii IZ na przykładzie flotacji mułów węglowych w KWK Pniówek. Sprawozdanie IMN nr 6939/2011
6. Gramała J., Łuczak R., Szczerba E., Zachariasz T.: Badania wpływu konstrukcji aeratora na flotację grubych ziaren węgla we flotownikach typu IF. Sprawozdanie IMN nr 6740/09
7. Zachariasz T., Szczepaniak K., Łuczak R., Śmieszek J.: Możliwość modernizacji maszyn flotacyjnych IZ-12 w oparciu o aeratory WD-560 we flotacji mułów węglowych. Sprawozdanie IMN nr 7166/13
8. Szczerba E., Zachariasz T., Rudnicka B., Cichy K.: Badania wpływu konstrukcji wirnika maszyny flotacyjnej na parametry rozkładu współczynnika prędkości flotacji. Sprawozdanie IMN nr 6661/09
9. Wieniewski A., Zachariasz T., Szczepaniak K.: Poprawa efektywności flotacji mułów węglowych poprzez zastosowanie nowej konstrukcji aeratora maszyny flotacyjnej. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 6 (520)/2014, str. 50-55



10. Wieniewski A., Zachariasz T.: Optimization of coal slurry flotation in polish large size flotation machines of the IF type. Materiały na konferencję: International Mining Conference „Advanced Mining for Sustainable Development”, Ha Long, 23-25 września 2010, Wietnam, s. 665-672
11. Zachariasz T., Gramała J., Szczerba E.: Określenie przydatności maszyn o przeciwnym przepływie dla flotacji mułów węglowych różnego pochodzenia. Nowoczesne technologie oraz zaawansowane materiały i wyroby w zrównoważonym rozwoju przemysłu metali nieżelaznych. Monografia PBZ-MNiSW-3/3/2006, IMN Gliwice 2010, str. 37-47
12. Wieniewski A., Zachariasz T., Bartoniek W., Yang R.: Doświadczenia z wdrażania wielkogabarytowych maszyn flotacyjnych do flotacji węgla. China Coal Engineering, Beijing 10/2009, str. 100-103
13. Zachariasz T.: Optymalizacja flotacji mułów węglowych w maszynach flotacyjnych typu IF, XVIII Konferencja „40 lat ZPMW KWK Jas-Mos 1969-2009” organizowana przez JSW S.A. i SITG, Wisła 2010
14. Olszewski M.: Urządzenia i systemy mechatroniczne. Podręcznik. Część 1. Wydawnictwo WSiP 2020
15. Olszewski M. i inni: Urządzenia i systemy mechatroniczne. Podręcznik. Część 2. Wydawnictwo REA s.j. 2009
16. <https://www.cttemag.pl> [dostęp 04 czerwca 2023]
17. <http://enko.pl/pl/index.html> [dostęp 04 czerwca 2023]
18. <https://aplisens.pl/> [dostęp 04 czerwca 2023]
19. <https://www.auma.com/pl/> [dostęp 04 czerwca 2023]
20. Steczkowski J., Zjawin T., Zachariasz T., Szczerba E., Gramała J.: Opracowanie systemu sterowania procesem flotacji w wielkogabarytowej maszynie flotacyjnej typu IF w KWK „Jas-Mos” I etap. Sprawozdanie IMN nr 6582/2008 jakości produktu końcowego
21. Woch M., Tomaka W., Zachariasz T., Łuczak R., Szczerba E.: Opracowanie systemu sterowania procesem flotacji w wielkogabarytowej maszynie flotacyjnej typu IF w KWK „Jas-Mos” II etap. Sprawozdanie IMN nr 6739/2009