

Flotacja łupka miedzionośnego w różnych flotownikach Hallimonda

Sandra Jaworska, Tomasz Ratajczak

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii,
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, tomasz.ratajczak@pwr.edu.pl

Streszczenie

W pracy badano wpływ odmiennych flotowników Hallimonda na flotację łupka miedzionośnego B w wodzie destylowanej i w obecności speniacza (MIBC). Zbadano wpływ różnych stężeń MIBC na przebieg tego procesu. Mierzono wysokość piany, określono kinetykę flotacji oraz wykonana została wizualizacja procesu. Na podstawie otrzymanych wyników i sporządzonych krzywych kinetyki flotacji stwierdzono, że wysokość celki i jej kształt ma wpływ na wyniesienie mechaniczne. Wykazano również, że stosując odpowiednio niskie stężenie speniacza w roztworze wodnym (0,05%÷0,1% dla flotownika dużego i 0,05% dla mniejszych flotowników) następuje polepszenie flotacji, a użycie dużego stężenia (0,5%÷1,0%) powoduje, że flotacja się pogarsza.

Wprowadzenie

Flotacja umożliwia rozdział ziarn, które różnią się między sobą hydrofobowością. Hydrofobowość to zdolność ciał do powierzchniowego zwilżania się wodą w obecności gazu (zazwyczaj powietrza). Substancje, które ulegają całkowitemu zwilżeniu przez wodę, to substancje hydrofilne. Natomiast te, które przylaczają się do pęcherzyka gazowego nazywane są hydrofobowymi (Gaudin, 1963; Drzymała, 2009).

Proces flotacji może być pianowy lub bezpianowy. Flotację pianową realizuje się przez zastosowanie speniaczy (odczynników spieniających) (Szajowska i inni, 2014). Powodują one zmniejszenie wielkości pęcherzyków powietrza, utworzenie stabilnej piany oraz przyspieszenie procesu flotacji.

Do procesu flotacji można zastosować mikroflotowniki Hallimonda, które umożliwiają flotację nawet pojedynczych ziarn. Prowadzenie flotacji w małej skali umożliwia określenie właściwości flotacyjnych składników nadawy w tani i szybki sposób. Informacje te wykorzystywane są do prognozowania zachowania się minerałów we flotacji rud w skali przemysłowej (Drzymała, 2009).

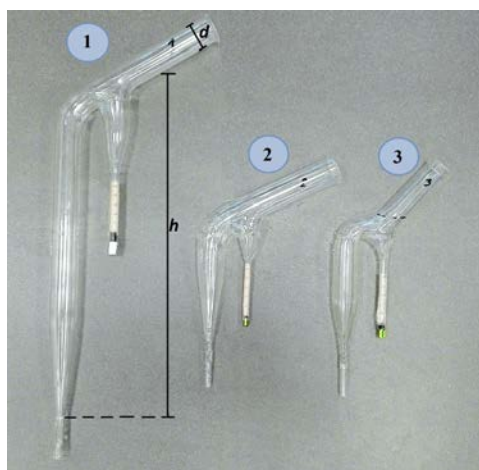
Oryginalny flotownik zaprojektowany został przez Hallimonda w 1944/45 roku (Fuerstenau i Healy, 1972). Wykonany był ze szkła i przeznaczony był do przepuszczania pęcherzyków powietrza przez zawieszinę mineralną i odbierania frakcji pływającej (Rao, 2004). Flotownik Hallimonda był modyfikowany przez Ewersa w 1955 roku oraz Fuerstenau i innych (Fuerstenau i Healy, 1972, Drzymała 2009).

Metodyka badań

Materiałem przeznaczonym do flotacji był łupek miedzionośny, któremu nadano symbol B. Pochodził on z Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego z ZG Lubin. Badany łupek zawierał 2,946% miedzi oraz 7,25% węgla organicznego. Przed wykonaniem badań, łupek

należało odpowiednio przygotować. Został poddany procesom rozdrabniania oraz przesiewania. Do procesu kruszenia wykorzystana została laboratoryjna kruszarka szczękowa typu LAB-01-65, natomiast mielenie rudy łupka miedzionośnego wykonano w dezintegratorze krzyżakowo-bijakowym SK300. Do badań przeznaczona została frakcja 0,07-0,1 mm.

W pracy do przeprowadzenia flotacji wykorzystane zostały flotowniki Hallimonda, różniące się między sobą wielkością i kształtem. Zostały kolejno ponumerowane numerami 1, 2, 3 (rys. 1). Parametry flotowników zostały zestawione w tabeli 1. Wysokość każdego z flotowników mierzona była od kapilary do górnego poziomu cieczy. Na części odbiorczej, każdego flotownika została umieszczona podziałka, umożliwiającą odczytanie skumulowanego procentowego wychodu flotowanego łupka miedzionośnego.



Rys. 1. Zastosowane flotowniki Hallimonda

Tabela 1. Parametry flotowników

Parametr	Flotownik 1	Flotownik 2	Flotownik 3
Wysokość celki, h , m	0,36	0,14	0,15
Przekrój poprzeczny celki, d , m^2	$0,625 \cdot 10^{-3}$	$0,607 \cdot 10^{-3}$	$0,487 \cdot 10^{-3}$
Objętość, m^3	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$

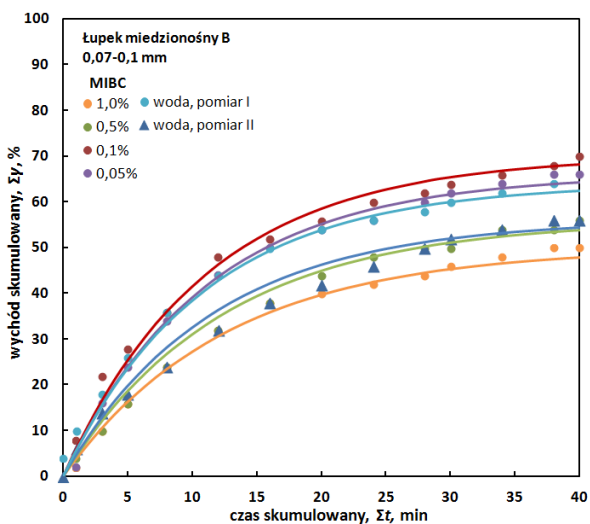
Część badawcza składała się z flotacji łupka miedzionośnego (uziarnienie 0,07-0,1 mm) w trzech użytych flotownikach Hallimonda (rys. 1). Jako spieniacz zastosowano roztwory wodne metyloizobutylokarbinolu ($C_6H_{14}O$, MIBC). W każdym flotowniku przeprowadzonych zostało po 5 flotacji (wzorcowa flotacja w wodzie destylowanej w temperaturze pokojowej oraz w roztworach MIBC o stężeniach wagowych 0,05%, 0,1%, 0,5%, 1,0%). Flotacje prowadzone były przez 40 minut. Skumulowany wychód odczytywano po 1, 3, 5, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 30, 34, 38 oraz 40 minutach flotacji.

Stanowisko flotacyjne składało się z zamontowanego na stojaku flotownika oraz elektrycznej pompki powietrza połączonej z przepływomierzem, który umożliwiał

przeprowadzanie flotacji przy ustalonym przepływie powietrza, utrzymywanym na poziomie około $4,6 \text{ dm}^3/\text{h}$.

Wyniki i dyskusja badań

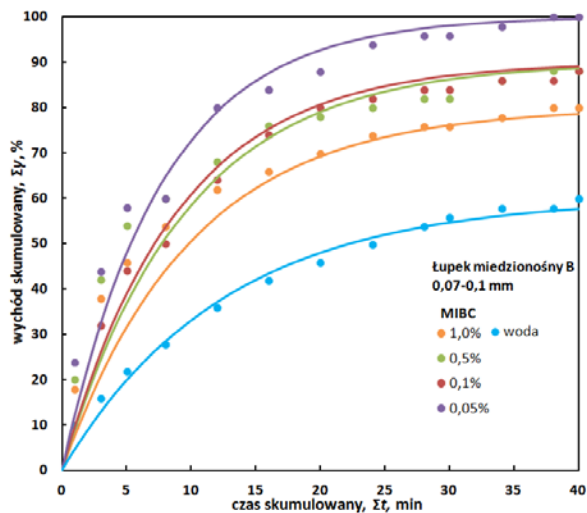
Na rys. 2-4 przedstawiono kinetykę flotacji łupka B w wodzie i w roztworach MIBC, przeprowadzaną we flotownikach 1-3 (rys. 1). W tabelach 2-4 zestawiono odpowiednio parametry k i γ_{\max} dla wykonanych kinetyk (I-rzędu) flotacji.



Rys. 1. Kinetyka flotacji (I-rzędu) łupka miedzionośnego B we flotowniku 1 w wodzie i w obecności MIBC o różnych stężeniach

Tabela 2. Parametry kinetyki flotacji (I-rzędu) łupka B, zgodnie z rys. 2

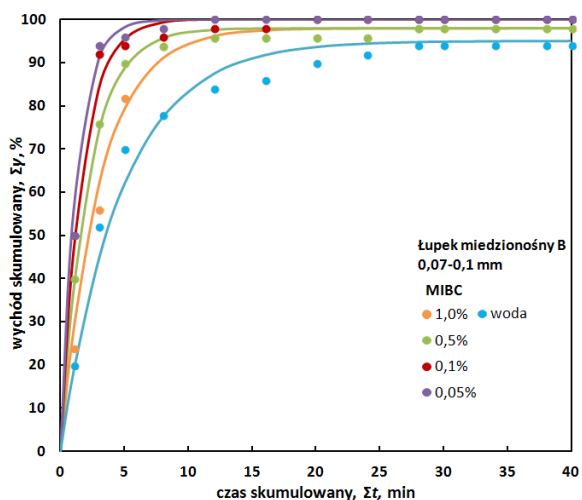
Flotownik 1						
Parametr	woda		MIBC			
	pomiar I	pomiar II	0,05%	0,1%	0,5%	1,0%
$k, \frac{1}{\text{min}}$	0,092	0,087	0,090	0,090	0,081	0,079
$\gamma_{\max}, \%$	64	56	66	70	56	50



Rys. 3. Kinetyka flotacji (I-rzęd) łupka miedzionośnego B we flotowniku 2 w wodzie i w obecności MIBC o różnych stężeniach

Tabela 3. Parametry kinetyki flotacji (I-rzęd) łupka B, zgodnie z rys. 3

Flotownik 2					
Parametr	woda	MIBC			
		0,05%	0,1%	0,5%	1,0%
$k, \frac{1}{\text{min}}$	0,080	0,130	0,113	0,105	0,100
$\gamma_{\text{max}}, \%$	60	100	88	88	80



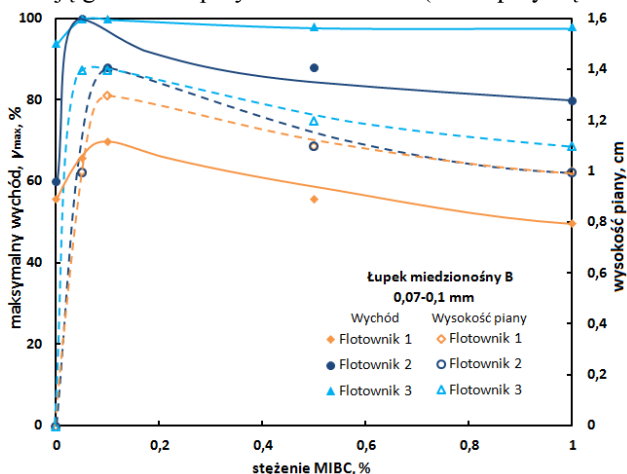
Rys. 4. Kinetyka flotacji (I-rzęd) łupka miedzionośnego B we flotowniku 3 w wodzie i w obecności MIBC o różnych stężeniach

Tabela 4. Parametry kinetyki flotacji (I-rzędu) łupka B, zgodnie z rys. 4

Flotownik 3					
Parametr	woda	MIBC			
		0,05%	0,1%	0,5%	1,0%
$k, \frac{1}{\text{min}}$	0,21	0,80	0,61	0,47	0,33
$\gamma_{\text{max}}, \%$	94	100	100	98	98

Na rysunku 5. przedstawiona została zależność maksymalnego wychodu łupka B od stężenia MIBC, w zależności od zastosowanego flotownika oraz wpływ stężenia MIBC na wysokość piany flotacyjnej w zależności od zastosowanego flotownika. Punkty pomiarowe aproksymowano krzywymi Béziera. Z rysunku wynika, że największe wychody w procesie flotacji uzyskane zostały przy użyciu flotownika 3. Zawierały się w przedziale od 94% do 100%, osiągając najmniejszą wartość podczas flotacji w wodzie, a największą w roztworze o stężeniu 0,05% oraz 0,1%. We flotowniku 2 maksymalne wychody również osiągały wysokie wartości. Największe otrzymane zostały dla stężenia 0,05% MIBC, natomiast najniższe (60%) dla wody. Najmniejsze wychody uzyskano przy zastosowaniu flotownika 1. W tym przypadku górną granicą maksymalnego wychodu było 70%, a dolną 50%.

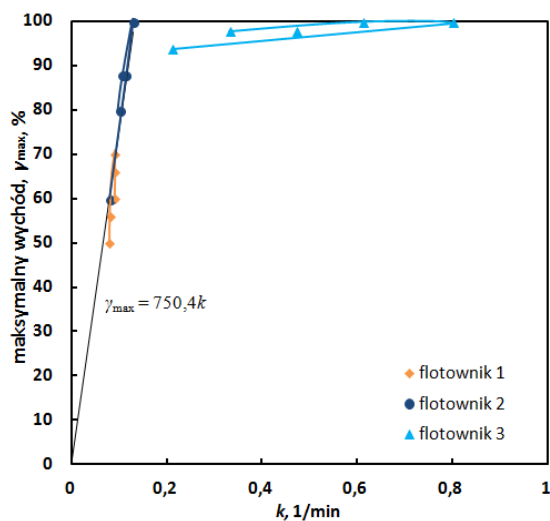
Badane wysokości pian kształtują się w podobny sposób, jak krzywe wychodu dla każdego z testowanych flotowników. Najwyższą pianę otrzymano podczas flotacji we flotownikach 2 i 3, lecz w przypadku flotownika modyfikowanego, piana równa 1,4 cm została uzyskana w roztworze o stężeniu 0,05% oraz 0,1%. Również przy tych stężeniach zostały osiągnięte największe wychody. Należy zauważyć, że we flotownikach różniących się skalą (flotowniki 1 i 2) wysokości pian mają generalnie przybliżone wartości (różne przy stężeniu 0,1%).



Rys. 5. Wpływ stężenia MIBC na wychód ziarn łupka miedzionośnego B i na wysokość piany flotacyjnej w zależności od zastosowanego flotownika

Na rysunku 6. przedstawiony został zbiorczy wykres zależności maksymalnego wychodu od stałej kinetyki flotacji I rzędu k (Brożek i Młynarczykowska, 2009), zwane krzywymi

limitów separacji (Drzymala et al., 2017), dla każdego z flotowników. Można zauważyć, że krzywe limitów dla flotowników 1 oraz 2 (urządzenia podobne kształtem) znajdują się w jednej linii, a wartość parametru k wynosi w granicach 0,08-0,13 1/min. Krzywe te są rozciągnięte w pionie, co jest wynikiem otrzymywania zróżnicowanych maksymalnych wychodów podczas flotacji. Otrzymane wyniki flotacji we flotownikach o zmiennej skali układają się w kształcie jednej prostej, opisanej wzorem: $\gamma_{\max} = 750,4k$. W przypadku flotownika nr 3 krzywa jest przesunięta na obszar większych wartości stałej szybkości flotacji (0,21-0,80 1/min). Duży zakres wartości parametru k skutkuje rozciągnięciem krzywej w płaszczyźnie poziomej. Podczas flotacji we flotowniku 3 przedział maksymalnych wychodów łupka B nie był szeroki (94-100%), co odwzorowane zostało na rysunku 6.



Rys. 6. Zbiorczy wykres zależności maksymalnego wychodu od stałej szybkości flotacji

W roztworze 0,05% MIBC we flotowniku 2, pod koniec przeprowadzanej flotacji, gdy wychód przekroczył wartość 94%, zaobserwowano utworzone agregaty ziarno-pęcherzyk gazowy. Przedstawione zdjęcie na rysunku 7., zostało wykonane podczas badania. Wyraźnie widać trzy przytwierdzone ziarna do pęcherzyków powietrza, które wyniesione zostały do utworzonej na powierzchni piany. Poniżej piany można również zauważyć niesione ziarna przez inne pęcherzyki. Zjawisko to potwierdza zachodzenie w przeprowadzanym badaniu, obok wyniesienia mechanicznego, prawdziwej flotacji.



Rys 7. Utworzone agregaty ziarno-pęcherzyk gazowy podczas flotacji we flotowniku 2 w obecności 0,05% MIBC

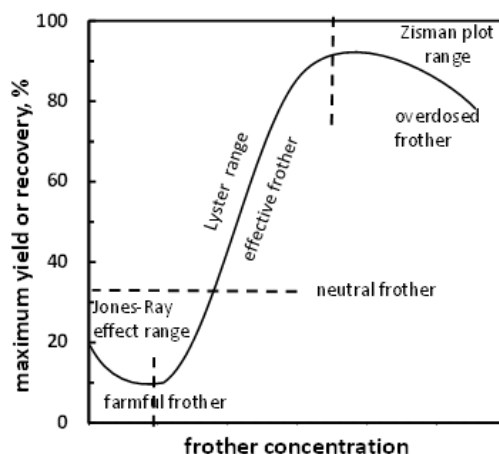
W celu dokładniejszego zaobserwowania zjawiska łączenia się pęcherzyka powietrza z ziarnem hydrofobowym, przeprowadzona została dodatkowa flotacja we flotowniku 1 w obecności 0,1% MIBC.

Podsumowanie i wnioski

Drzymała (2014), w wyniku porównania bezpianowej bezkolektorowej flotacji łupka z hydrofilnym gipsem oraz hydrofobowym krzemem pierwiastkowym stwierdził, że jego wychód jest spowodowany wyniesieniem mechanicznym. Analizując uzyskane w tej pracy wyniki, można stwierdzić, że wychody łupka miedzionośnego otrzymane podczas flotacji w wodzie destylowanej, również były skutkiem wyniesienia mechanicznego (Konopacka, 2005). Potwierdzone to zostało również w pracach Szajowskiej i innych (2014), Smólskiej i Ratajczaka (2017). Stwierdzono, że hydrofobowość jest warunkiem koniecznym, lecz niewystarczającym, aby możliwe było zajście procesu flotacji ziarn mineralnych (Szajowska i inni, 2014). Według Drzymały (2009) wraz ze wzrostem wysokości celki Hallimonda, wyniesienie mechaniczne spada, co uzasadnione zostało otrzymanymi badaniami, ponieważ wychód łupka we flotowniku 1, którego wysokość celki była największa, był znacznie mniejszy, niż wychody w pozostałych dwóch flotownikach. Stąd ogólnym stwierdzeniem jest, że wielkość oraz kształt stosowanego flotownika Hallimonda ma wpływ na otrzymywane wyniki flotacji. Należy również zaznaczyć, że we flotowniku 3 proces przebiegał znacznie szybciej i lepiej, niż w pozostałych urządzeniach.

Po wprowadzeniu do wody MIBC ma miejsce flotacja, co przedstawione zostało na rysunku 7. Użycie spieniacza spowodowało zmniejszenie napięcia powierzchniowego roztworu, co doprowadziło do zmniejszenia się wielkości pęcherzyków powietrza i utworzenia stabilnej piany (Drzymała, 2009). Innym skutkiem działania spieniacza, było skrócenie czasu utworzenia kontaktu na granicach ciała stałe-ciecz-gaz, dzięki czemu proces flotacji przebiegał szybciej, w porównaniu do flotacji wzorcowej (Witecki i inni, 2014).

Wyniki badań dla każdego z flotowników wykazują, że odpowiednio mała dawka odczynnika spieniającego polepsza flotację, natomiast zastosowanie zbyt dużej ilości MIBC powoduje jej pogorszenie. W przypadku flotownika 1 polepszenie nastąpiło dla dwóch najmniejszych stężeń, przy czym największy wychód został osiągnięty dla stężenia 0,1% (rys. 2.). Przy kolejnych stężeniach flotacje wypadły gorzej, niż flotacja w samej wodzie. We flotownikach 2 i 3 badania przebiegły najpomyślniej dla stężenia 0,05% (rys. 5.). Wyższe stężenia spowodowały pogorszenie flotacji, lecz osiągnięte wychody miały większe wartości, niż w przypadku flotacji wzorcowej. Analizując krzywe na rysunku 5. wyraźnie widać wzrost otrzymywanego wychodu dla niskich stężeń oraz jego spadek dla stężeń większych. Odzwierciedla to zależność przedstawioną na rysunku 8. Zobrazowany został tam wpływ stężenia spieniacza na maksymalny wychód, gdzie wpływ ten może być zróżnicowany (Drzymała i Kowalczyk, 2017). Początkowo dla bardzo niskich stężeń, następuje pogorszenie flotacji, gdzie wychód jest niższy, niż w przypadku braku odczynnika spieniającego. Zjawisko to nazywane jest efektem Jonesa-Raya. Wtedy też, napięcie powierzchniowe maleje, a na granicy fazowej woda-powietrze następuje zwiększenie się ładunku elektrycznego (Drzymała, 2009). Stopniowe zwiększanie dawki odczynnika wykazuje polepszenie procesu flotacji, lecz zastosowanie zbyt dużego stężenia, prowadzi do przedawkowania i ponownego pogorszenia flotacji. To ostatnie zjawisko nazywane jest efektem Zismana (rys.8) (Drzymała, 2009).



Rys. 8. Wpływ stężenia spieniacza na maksymalny wychód flotacji (Drzymała i Kowalczyk, 2017)

Analizując otrzymane podczas badań wyniki, można stwierdzić, że wychód flotacyjny badanego łupka jest zależny od stosowanego do procesu flotownika Hallimonda. Najmniejszy wychód, którego maksymalna wartość wynosiła 56%, miał miejsce w przypadku flotownika o najdłuższej celce. Ponadto stwierdzono, że kształt również ma znaczenie, ponieważ wychody otrzymane podczas flotacji w wodzie we flotowniku 3 były większe o 34%, w porównaniu do flotownika 2. Wykazano również, że odpowiednio mała ilość czynnika spieniającego poprawia proces flotacji, a użycie zbyt dużej dawki pogarsza flotację (rys. 5.). Obserwowany w pracy wychód flotacyjny łupka był sumą wyniesienia mechanicznego oraz flotacji.

Podziękowania

Niniejszy artykuł oparty jest na pracy inżynierskiej Sandry Jaworskiej *Flotacja łupka miedzionośnego we flotownikach Hallimonda* (opiekun Tomasz Ratajczak) wykonanej w roku 2017 na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Przygotowanie tego artykułu sfinansowane zostało z grantu statutowego 0401/0129/17.

Literatura

- BROŻEK M., MŁYNARCZYKOWSKA A., 2009. *Kinetyka flotacji*, Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, 48-56.
- DRZYMAŁA J., 2014. *Flotometryczna hydrofobowość łupka miedzionośnego*. W: Łupek miedzionośny, Drzymała J., Kowalczyk P. B. (red.), WGGG PWR, Wrocław, 77-82.
- DRZYMAŁA J., 2009. *Podstawy mineralurgii*, Wyd. 2. zm., Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław, 128-133, 161-167, 251-269, 283-292, 313-317, 374-379.
- DRZYMAŁA J., KOWALCZYK P. B., 2017. *Classification of flotation frothers*, Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Geoenvironment, Mining and Geology, Norwegian University of Science and Technology, Wrocław, Department of Geoscience and Petroleum, Norway.
- DRZYMAŁA J., RATAJCZAK T., KOWALCZYK B.P., 2017. *Kinetic separation curves based on process rate considerations*, Physicochem. Probl. Miner. Process, 53(2), 983-995.
- FUERSTENAU D. W., HEALY T. W., 1972. *Principles of mineral flotation*. W: Adsorptive Bubble Separation Techniques, Lemlich R. (red.), Academic Press, New York and London, 92-96.
- GAUDIN A. M., 1963. *Flotacja*, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 413-425.

- KONOPACKA Ź., 2005. *Flotacja mechaniczna*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 53 – 59.
- RAO S. R., 2004. *Surface Chemistry of Froth Flotation*, Volume 1: Fundamentals, Second Edition, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, New York, 43-46.
- SMÓLSKA A., RATAJCZAK T., 2017. *Flotacja mechaniczna łupka miedzionośnego we flotowniku Hallimonda w roztworach soli podwyższających i obniżających napięcie powierzchniowe wody*. W: Łupek miedzionośny III, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWr, Wrocław, 97-102.
- SZAJOWSKA J., WEJMAN K., KOWALCZUK B. P., 2014. *Flotacja pianowa ziarn łupka i kwarcu w celce Hallimonda*. W: Łupek miedzionośny, Drzymała J., Kowalczyk P.B. (red.), WGGG PWr, Wrocław, 91-97.
- WITECKI K., DUCHNOWSKA M., KOWALCZUK P. B., 2014. *Rozmiar i hydrofobowość flotujących ziarn łupka miedzionośnego w obecności speniaczy*, W: Łupek miedzionośny, Drzymała J., Kowalczyk P.B. (red.), WGGG PWr, Wrocław, 83 – 90.