

# Selektywna flotacja łupka miedzionośnego z mieszaniny z kwarcem w zależności od stężenia soli i rodzaju urządzenia flotacyjnego

Karolina J. Pappel, Tomasz Ratajczak

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

---

## Streszczenie

W pracy zbadano selektywną flotację łupka miedzionośnego B z mieszaniny z kwarcem w zależności od stężenia chlorku potasu i rodzaju urządzenia flotacyjnego (flotownik Hallimonda, maszyna flotacyjna). Wykazano, że wraz ze wzrostem stężenia KCl rośnie uzysk w koncentracji zarówno łupka miedzionośnego B i kwarcu we flotowniku Hallimonda. W maszynie flotacyjnej uzyski rosną dla stężeń 0 M-1 M KCl, a w przedziale 1 M-3 M flotacja zachodzi na stałym poziomie. Badania wykazały także szybszą i lepszą flotację łupka miedzionośnego B w porównaniu z kwarcem, zarówno w przypadku flotacji w wodzie destylowanej, jak i w roztworze soli, a także badanych flotownikach.

---

## Wprowadzenie

W przeróbce rud siarczkowych miedzi najczęściej wykorzystywana jest flotacja. W skali laboratoryjnej do przeprowadzenia tego procesu wykorzystuje się różne typy urządzeń, rodzaje i stężenia odczynników. Szczególnym przypadkiem flotacji jest flotacja solna wykorzystująca do wzbogacania, obok spieniaczy, elektrolity takie jak kwasy, zasady czy sole, które również powodują flotację łupka spieniając roztwory wodne (Ratajczak i Drzymała, 2003; Drzymała, 2009; Ratajczak, 2017).

W pracy zbadano selektywną flotację łupka miedzionośnego B z mieszaniny z kwarcem w roztworach soli (KCl). Analizie poddany również został wpływ rodzaju urządzenia flotacyjnego na flotację łupka i kwarcu. Badania prowadzono w maszynie flotacyjnej typu Mechanobr oraz we flotowniku Hallimonda.

## Metodyka badań

W badaniach użyto łupek miedzionośny B pochodzący z Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego oraz kwarc z Kopalni i Zakładu Przeróbczego Piasków Szklarskich Osiecznica Sp. z o.o. Próbkę materiałów skruszono i przesiano uzyskując frakcję ziarnową poniżej 0,1 mm.

Rozdział łupka miedzionośnego i kwarcu przeprowadzono w dwóch różnych typach urządzeń wykorzystywanych we flotacji w skali laboratoryjnej: w maszynie flotacyjnej typu Mechanobr, wyposażoną w celkę o pojemności 0,25 dm<sup>3</sup> oraz we flotowniku Hallimonda o pojemności 200 cm<sup>3</sup>. Doświadczenia przeprowadzono przy stałym przepływie powietrza, gdyż najlepsza flotacja w maszynie flotacyjnej zachodzi przy przepływie powietrza równym 40 dm<sup>3</sup>/h oraz 3-4 dm<sup>3</sup>/h we flotowniku Hallimonda (Jastrzębski i Kowalczyk, 2016). Badania prowadzono w wodzie oraz wodnych roztworach chlorku potasu (KCl) o stężeniu 0,5 M, 1 M lub 3 M.

Do flotacji w maszynie flotacyjnej przyjęto naważkę kwarcu i łupka miedzionośnego w ilości po 25 g, łącznie 50 g. Czas flotacji wynosił 30 minut. Produkty zbierano przez 1, 3, 5, 9 i 12 minut. Podczas zgarniania piany utrzymywano zawiesinę w stałej ilości, dolewając przygotowany wcześniej roztwór soli. W przypadku badań prowadzonych we flotowniku Hallimonda, przyjęto naważkę łupka miedzionośnego i kwarcu o masie 2,0 g (zachowując stosunek masowy 1:1), jako równoważną ilość materiału stanowiącą wychód 100%. Powstałe podczas flotacji koncentraty oraz odpad suszono w temperaturze 105 °C przez 24 godziny, przesączając je wcześniej przez lejek Buchnera z użyciem wody destylowanej. Wysuszone i zważone produkty poddawano następnie analizie mikroskopowej określając stosunek wyflotowanych ziarn łupka miedzionośnego do ziarn kwarcu.

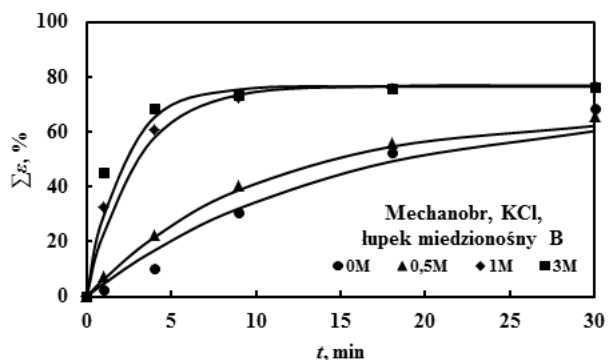
## Wyniki i dyskusja badań

### Flotacja mieszaniny łupka miedzionośnego B i kwarcu w maszynie flotacyjnej

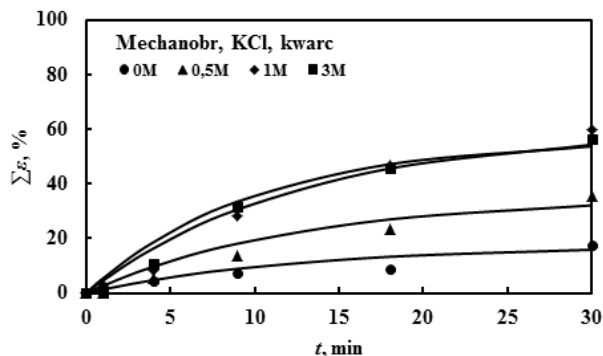
Na rys. 1. i 2. przedstawiono kinetykę flotacji łupka miedzionośnego B (rys. 1) i kwarcu (rys. 2) w zależności od stężenia KCl, prowadzonej w maszynie flotacyjnej. Z rys. 1 wynika, że wraz ze wzrostem stężenia odczynnika rośnie uzysk łupka, przy czym dla stężenia 1 M i 3 M maksymalny uzysk łupka miedzionośnego B ma podobną wartość, wynoszącą około 76%. Ponadto, wraz ze wzrostem stężenia KCl, flotacja łupka zachodzi zarówno szybciej jak i lepiej. Podobne wyniki otrzymano w pracy Bajek i Ratajczak (2016) flotując łupek miedzionośny w wodnym roztworze NaCl o stężeniach 0,5 M, 1 M i 2 M z tym, że dla stężeń 1 M i 2 M uzysk maksymalny jest wyższy, na poziomie 97%, co związane jest prawdopodobnie z wyższym napięciem powierzchniowym wodnego roztworu NaCl niż KCl (Pugh i inni, 1997).

Na podstawie rys. 2., można stwierdzić, że wartości uzysku rosną wraz ze wzrostem stężenia odczynnika, ale zachodzi tutaj jedynie flotacja mechaniczna (Konopacka, 2005; Szyszka i inni, 2008).

Podobne badania nad mieszaniną łupka miedzionośnego i kwarcu w stosunku 4:1 prowadzono w MIBC, butanolu oraz  $C_{16}E_{20}$  w trzech stężeniach, co opisano w pracy Penga i Drzymały (2014). Stwierdzono brak flotacji kwarcu podobnie jak w przypadku KCl, a przy najwyższych stężeniach odczynników otrzymano wyższe uzyski maksymalne dla łupka miedzionośnego niż w przypadku 3 M KCl.



Rys. 1. Uzysk łupka miedzionośnego B z mieszaniny z kwarcem w czasie dla różnych stężeń KCl w maszynie flotacyjnej typu Mechanobr



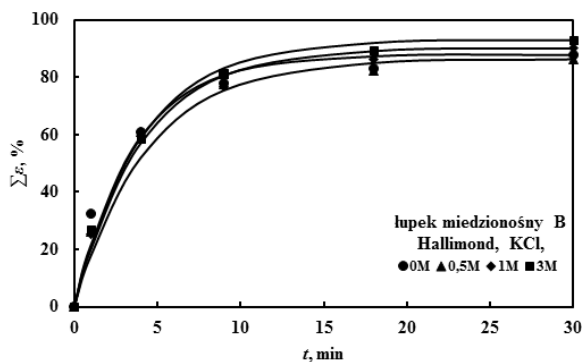
Rys. 2. Uzysk kwarcu z mieszaniny z łupkiem miedziowym B w czasie dla różnych stężeń KCl w maszynie flotacyjnej typu Mechanobr

### Flotacja mieszaniny łupka miedziowego B i kwarcu we flotowniku Hallimonda

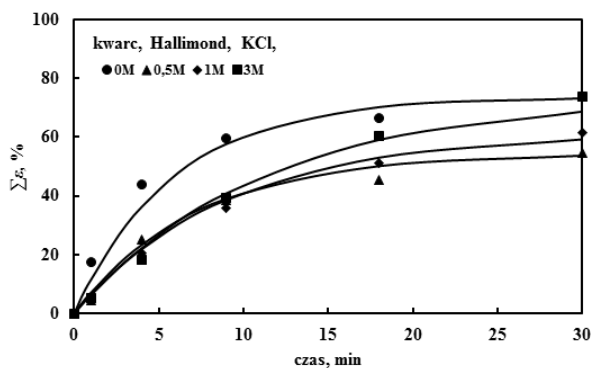
Na rys. 3. i 4. przedstawiono kinetykę selektywnej flotacji łupka miedziowego B (rys.3.) i kwarcu (rys. 4.) w zależności od stężenia KCl, prowadzonej we flotowniku Hallimonda.

Z rys. 3. wynika, że wraz ze wzrostem stężenia chlorku potasu flotacja zachodzi szybciej i lepiej oraz rośnie wartość maksymalnego uzysku łupka miedziowego B od wartości 86% dla 0,5 M KCl do 93% dla 3 M KCl. Wyniki badania przeprowadzonego w wodzie destylowanej porównywalne są z flotacją 1 M KCl. Otrzymane wyniki porównać można do pracy badającej wpływ  $C_4P_3$  na łupkę miedziową, gdzie również wraz ze wzrostem stężenia odczynnika rośnie uzysk łupka miedziowego (Szyszka i inni, 2014). Podobne wyniki otrzymano w pracy (Szajowska i inni, 2014) badając flotację pianową łupka miedziowego i kwarcu niezależnie wykazując wzrost uzysku ze wzrostem stężenia spieniacza. Również Smólska i Ratajczak (2017) badali wpływ soli NaCl,  $Na_2SO_4$  i  $KPF_6$  na flotację łupka miedziowego o uziarnieniu  $<0,1mm$  uzyskując jednak wychody poniżej 70% w przypadku każdej soli. W przypadku soli NaCl i  $Na_2SO_4$  zaobserwowano także wzrost wychodu proporcjonalnie do wzrostu stężenia soli oraz spadek wychodu wraz ze wzrostem stężenia soli  $KPF_6$ .

Na rysunku 4. zobrazowano krzywe kinetyki flotacji kwarcu z mieszaniny z łupkiem B w zależności od stężenia użytego odczynnika. W przypadku kwarcu flotacja zachodziła najszybciej pod wpływem wody destylowanej, otrzymując wartość uzysku porównywalną z 3 M KCl. Badania nad flotacją kwarcu prowadzili również Długosz i Czerwińska (1986) wykazując wzrost uzysku ze wzrostem stężenia aminy  $C_{12}$  uzyskując także lepsze uzyski maksymalne w porównaniu z KCl. Dla flotacji solnej wraz ze wzrostem stężenia KCl flotacja zachodzi szybciej i lepiej osiągając wartość najniższą 54% dla 0,5 M KCl i najwyższą 69% dla 3 M KCl.



Rys. 3. Kinetyka flotacji łupka miedzionośnego B z mieszaniny z kwarcem w wodnych roztworach KCl w flotowniku Hallimonda

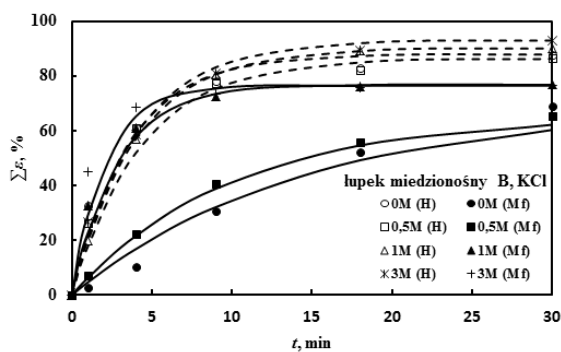


Rys. 4. Kinetyka flotacji kwarcu z mieszaniny z łupkiem miedzionośnym B w wodnych roztworach KCl w flotowniku Hallimonda

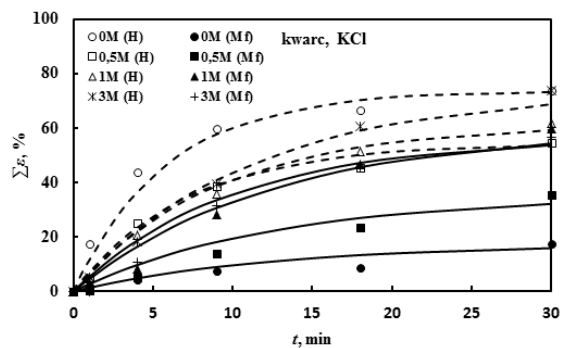
Na rysunku 5., powstałym na podstawie rys. 1. i 2., zestawiono krzywe zależności uzysku łupka miedzionośnego B od czasu i z podziałem na rodzaj użytego flotownika. Stwierdzono, że od dziewiątej minuty badania flotacja we flotowniku Hallimonda przebiega szybciej i lepiej niż w maszynie flotacyjnej, dając wyższe wartości uzysków. W trzeciej minucie najwyższą wartość uzysku otrzymano natomiast w maszynie flotacyjnej przy stężeniu 3 M KCl. Najwyższą wartość uzysku otrzymano podczas badania przy najwyższym 3 M stężeniu KCl w Hallimondzie, a najniższą w wodzie destylowanej w maszynie flotacyjnej. Flotacja w wodzie destylowanej przebiegała szybciej i lepiej w Hallimondzie, w 0,5 M KCl była szybsza i lepsza także w Hallimondzie, w 1 M KCl przebiegała szybciej, ale gorzej w maszynie flotacyjnej. Dla 3 M KCl łupek najszybciej flotował do 6 minuty w maszynie flotacyjnej, następnie uzysk niewiele wzrósł i od 15 minuty przyjmował wartości zbliżone do flotacji w 1M KCl w maszynie flotacyjnej. Wyższe uzyski, sięgające ponad 90%, otrzymano natomiast w pracy Skowrońskiej i Drzymały (2016) o flotację łupka miedzionośnego w wodnym roztworze chlorku sodu, który ma większą wartość napięcia powierzchniowego niż chlorek potasu (Pugh i inni, 1997).

Na rysunku 6. sporządzonym na podstawie rys. 3. i 4., zestawiono krzywe zależności uzysku kwarcu od czasu przy różnych stężeniach wodnego roztworu chlorku potasu oraz

z podziałem na rodzaj użytego flotownika. Stwierdzono, że w przypadku kwarcu zachodzi jedynie flotacja mechaniczna spowodowana wyniesieniem mechanicznym ziarn mineralnych o czym świadczą jego niewielkie uzyski, nieprzekraczające 75%. Porównując oba typy flotowników zauważyć można, że flotacja przebiega lepiej w Hallimondzie przy każdym stężeniu KCl. Najgorzej i najwolniej kwarc flotował w wodzie destylowanej w maszynie flotacyjnej, następnie wraz ze wzrostem stężenia KCl flotował szybciej i lepiej w maszynie flotacyjnej, aż do maksymalnego uzysku dla 1 M KCl i nieco niższym dla 3 M KCl. W Hallimondzie najwyższy uzysk kwarcu otrzymano w wodzie destylowanej, co może świadczyć o błędnie przeprowadzonym badaniu, jednak nie powtórzono ponownie flotacji. Flotacja solna w roztworze KCl zachodzi lepiej i szybciej wraz ze wzrostem stężenia soli we flotowniku Hallimonda, a uzysk dla 3 M KCl zbliżony jest do otrzymanego w wodzie destylowanej, jednak w dalszym ciągu uzyski te są dużo gorsze w porównaniu z łupkiem miedziowym B (rys. 5), czy flotacją kwarcu w aminach (Milewski inni, 2016).



Rys. 5. Uzysk łupka miedziowego w czasie, w zależności od stężenia KCl i rodzaju flotownika (H – Hallimond, Mf – Mechanobr)

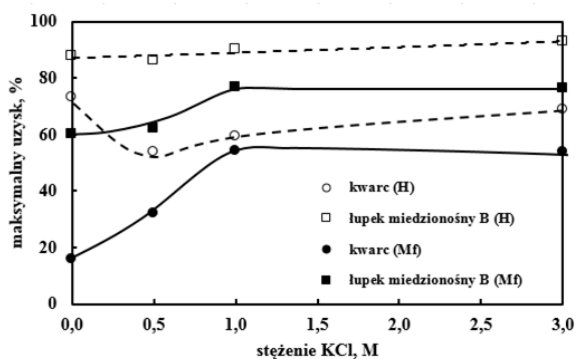


Rys. 6. Uzysk kwarcu w czasie w zależności od stężenia KCl i rodzaju flotownika (H – Hallimond, Mf – Mechanobr)

Na rysunku 7. przedstawiono zależność maksymalnego uzysku łupka miedziowego B i kwarcu w zależności od stężenia odczynnika z podziałem na rodzaj flotownika użytego do badania (H – flotownik Hallimonda, Mf – maszyna flotacyjna typu Mechanobr). W przypadku maszyny flotacyjnej zaobserwowano wzrost wartości maksymalnego uzysku dla

łupka miedzionośnego B i kwarcu przy wzroście stężenia KCl od 0 M do 1 M. Dalsze zwiększenie stężenia KCl do 3 M nie spowodowało wzrostu uzysku zarówno łupka B jak i kwarcu (rys. 7.). W przypadku badań przeprowadzonych we flotowniku Hallimonda zaobserwowano spadek wartości maksymalnego uzysku zarówno w przypadku łupka miedzionośnego B jak i kwarcu przy wzroście stężenia z 0 M do 0,5 M (rys. 7.). Następnie, podczas flotacji solnej zauważono wzrost wartości maksymalnego uzysku łupka miedzionośnego B i kwarcu wraz ze wzrostem stężenia chlorku potasu (rys. 7.).

Porównując oba flotowniki lepsze rezultaty uzyskano flotując oba materiały w Hallimondzie, przy czym podobną wartość uzysku maksymalnego otrzymano dla 1 M stężenia KCl, flotując kwarc zarówno w Hallimondzie jak i maszynie flotacyjnej (rys. 7.). Badania flotacji solnej prowadzili także Kuklińska i Ratajczak (2016) analizując wpływ rodzaju odczynnika będącego wodnym roztworem soli KCl, NaCl i  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i jego stężenia do 2 M na wychód łupka miedzionośnego. Zaobserwowali oni spadek wychodu łupka miedzionośnego zwiększając stężenie NaCl z 0,3 M na 0,5 M. Podobne zjawisko miało miejsce w przypadku flotacji w Hallimondzie przy zwiększaniu stężenia z 0 M na 0,5 M KCl. Ratajczak i Drzymała (2003) tłumaczą taki spadek wychodu czy uzysku wpływem niskich stężeń soli na napięcie powierzchniowe roztworu. Badania nad mieszaniną łupka miedzionośnego i kwarcu prowadzili także Milewski i inni (2016) badając ich uzysk w butyloaminie i heksyloaminie i wykazując lepszą flotację w heksyloaminie sięgającą blisko 100%, co związane jest zapewne z lepszymi właściwościami hydrofobizującymi heksyloaminy.



Rys. 7. Maksymalny uzysk łupka miedzionośnego i kwarcu w zależności od stężenia KCl i rodzaju flotownika (H – Hallimond, Mf – maszyna flotacyjna)

## Wnioski

W pracy zbadano wpływ rodzaju flotownika oraz stężenia chlorku potasu na flotację selektywną łupka miedzionośnego B z mieszaniny z kwarcem. Wykazano, że flotacja zachodzi lepiej we flotowniku Hallimonda zarówno w przypadku łupka miedzionośnego B jak i kwarcu (rys. 7.). Ponadto, analizując przebieg flotacji solnej stwierdzono, że wraz ze wzrostem stężenia chlorku potasu rośnie uzysk łupka miedzionośnego B i kwarcu we flotowniku Hallimonda. W maszynie flotacyjnej uzysk łupka B i kwarcu rośnie od stężenia 0 M do 1 M, a następnie przyjmuje podobne wartości (rys. 7.). Badania wykazały także szybszą i lepszą flotację łupka miedzionośnego B w porównaniu z kwarcem zarówno w przypadku flotacji w wodzie destylowanej, soli, a także uwzględniając rodzaj flotownika (rys. 7.).

## Podziękowania

Niniejszy artykuł oparty jest na pracy inżynierskiej Karoliny J. Pappel *Selektywna flotacja łupka miedzionośnego i kwarcu w obecności soli* (opiekun Tomasz Ratajczak) wykonanej w roku 2017 na Wydziale Geoinżynierii, Górnicztwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Przygotowanie tego artykułu sfinansowane zostało z grantu statutowego 0401/0129/17.

## Literatura

- BAJEK K., RATAJCZAK T., 2016. *Wpływ spieniacza na flotację solną łupka miedzionośnego*. Łupek miedzionośny I, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWr, Wrocław.
- DŁUGOSZ W., CZERWIŃSKA M., 1986. *Selective flotation of quartz (in Polish)*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 18 (1986), 85-92.
- DRZYMAŁA J., 2009. *Podstawy mineralurgii*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- JASTRZĘBSKI J.M., KOWALCZUK P. B., 2016. *Wpływ rodzaju gazu na flotację łupka miedzionośnego w celce Hallimonda*. Łupek miedzionośny I, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWr, Wrocław.
- KONOPACKA Ż., 2005. *Flotacja mechaniczna*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- KUKLIŃSKA M., RATAJCZAK T., 2016. *Flotacja łupka miedzionośnego w wodnych roztworach soli*. Łupek miedzionośny I, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWr, Wrocław.
- MILEWSKI K., RATAJCZAK T., KOWALCZUK P.B., 2016. *Flotacja ziarn łupka miedzionośnego i kwarcu w obecności amin*. Łupek miedzionośny I, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWr, Wrocław.
- PENG M., DRZYMAŁA J., 2014. *Porównywanie uzysków łupka miedzionośnego flotacyjnie separowanego z mieszaniny modelowej z kwarcem w obecności speniaczy*. Łupek miedzionośny I, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWr, Wrocław.
- PUGH R., WEISSENBORN P., PAULSON O., 1997. *Flotation in inorganic electrolytes; the relationship between recovery of hydrofobic particles, surface tension, bubble coalescence and gas solubility*. Int. J. Miner. Process., 51, 125-138.
- RATAJCZAK T., 2017. *Właściwości łupka miedzionośnego z rejonu LGOM*. Łupek miedzionośny III, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWr, Wrocław, doi: 10.5277/lupek1703.
- RATAJCZAK T., DRZYMAŁA J., 2003. *Flotacja solna*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- SKOWROŃSKA A., DRZYMAŁA J., 2016. *Flotacja łupka miedzionośnego w obecności elektrolitów podwyższających i obniżających napięcie powierzchniowe wody*. Łupek miedzionośny I, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWr, Wrocław.
- SMÓLSKA M., RATAJCZAK T., 2017. *Flotacja mechaniczna łupka miedzionośnego we flotowniku Hallimonda w roztworach soli podwyższających i obniżających napięcie powierzchniowe wody*. Łupek miedzionośny III, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWr, Wrocław, doi: 10.5277/lupek1710.
- SZAJOWSKA J., WEJMAN K., KOWALCZUK P.B., 2014. *Flotacja pianowa ziarn łupka i kwarcu w celce Hallimonda*. Łupek miedzionośny I, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWr, Wrocław.
- SZYSZKA D., GLAPIAK E., DRZYMAŁA J., 2008. *Entertainment-flotation activity of quartz in the presence of selected frothers*, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 42 (2008), 85-90.
- SZYSZKA D., SIWIAK M., KOWALCZUK P.B., 2014. *Kinetyka flotacji łupka miedzionośnego za pomocą eteru butylo-trójpropylenoglikolowego (C<sub>4</sub>P<sub>3</sub>)*. Łupek miedzionośny I, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWr, Wrocław.