

Wpływ prędkości mieszania na spieniaczową flotację ziarn łupka miedzionośnego o różnych rozmiarach

Patrycja Bednarek¹, Jan Drzymala², Przemysław B. Kowalczyk^{3,4}

¹KGHM Polska Miedź S.A., Skłodowskiej-Curie 48, 59-301 Lubin, Poland,

²Emerytowany Profesor PWr, e-mail: jan.drzymala@pwr.edu.pl

³Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny, Katedra Chemii Analitycznej i Metalurgii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: przemyslaw.kowalczyk@pwr.edu.pl

⁴NTNU Norwegian University of Science and Technology, Department of Geoscience and Petroleum, Sem Sælands vei 1, 7491 Trondheim, Norway, e-mail: przemyslaw.kowalczyk@ntnu.no

Streszczenie

W pracy badano wpływ hydrodynamiki flotacji, regulowanej prędkością obrotową mieszadła, na uzyski poszczególnych rozmiarów ziarn łupka miedzionośnego. Badania przeprowadzono przy pięciu prędkościach wirnika maszyny flotacyjnej w zakresie od 700 do 1500 obrotów na minutę. Określono uzyski ziarn oraz kinetykę ich flotacji oraz wzbogacalności łupka. Zależność uzysku od rozmiaru ziarn miała typowy charakter dzwonowy. Najlepiej flotowały ziarna o średnicy 15 μm , podczas gdy w nadawie najwięcej było ziarn o średnicy 30 μm . Zaobserwowano, że zwiększanie liczby obrotów wirnika zwiększa zarówno wychód flotowanego materiału, jak i uzysk poszczególnych klas ziarnowych, wpływa na szybkość flotacji i umożliwia osiągnięcie wyższych uzysków. Nieco inaczej wyglądała zależność stałej kinetycznej I rzędu flotacji klas ziarnowych od prędkości obrotowej wirnika, gdyż maksimum wartości stałej wystąpiło przy 1300 obrotów /minutę, a potem następował jej spadek. Stwierdzono, że bardzo użyteczny jest wykres stała kinetyczna flotacji od rozmiaru ziarn posiadający obie skale logarytmiczne, na którym występują zależności liniowe dla drobnych, średnich i grubych ziarn. W każdym przeprowadzonym eksperymencie zaszło niewielkie wzbogacanie produktów pianowych flotacji w miedź. Przyczyną niskich uzysków miedzi w koncentraty flotacyjnych był charakter łupka oraz brak użycia odczynnika zbierającego, a flotacja miała miejsce dzięki naturalnej jego hydrofobowości. Proces wzbogacania w miedź był podobny dla wszystkich zastosowanych obrotów wirnika.

Wprowadzenie

Wszystkie zmienne w procesie flotacji wpływają i oddziałują na siebie, a w szczególności ważna jest relacja między rozmiarem ziarn i rozproszonych pęcherzyków powietrza (Rao, 2004). Na flotację duży wpływ mają właściwości hydrodynamiczne układu determinowane prędkością wirnika i strumień przepływu powietrza. Umożliwia to przyłączenie hydrofobowego ziarna do pęcherzyka gazu, a co za tym idzie jego flotację do warstwy piany, gdzie zostaje zebrany jako koncentrat flotacyjny. Hydrodynamika flotacji zależy od maszyny flotacyjnej (Cilek i Yilmazer, 2003). W celu określenia wpływu hydrodynamiki flotacji łupka na uzysk jego ziarn o różnych rozmiarach i na czas flotacji przeprowadzono serię eksperymentów z użyciem tylko spieniacza, gdyż badany łupek był naturalnie hydrofobowy (Bednarek i Kowalczyk, 2014). Otrzymane wyniki powinny dostarczyć ważnych danych o tym aspekcie flotacji łupka.

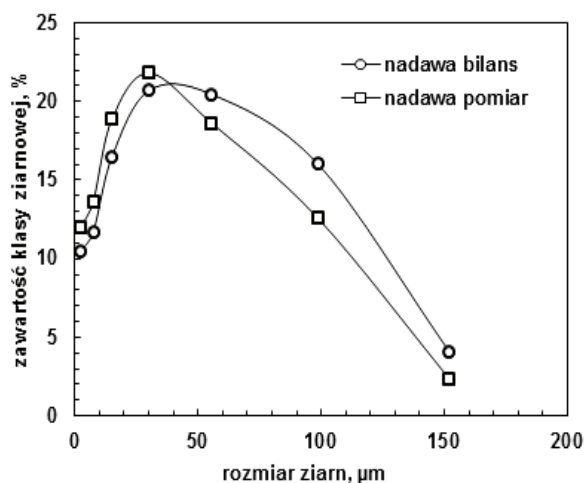
Metodyka badań i materiały

Do badań użyto łupka miedzionośnego, pochodzącego z oddziału Zakłady Górnicze Polkowice-Sieroszowice KGHM Polska Miedź S.A. Jako spieniacza użyto eter butylo-trójpropylenoglikolowy, który oznaczany jest symbolem (C₄P₃).

Badany łupek miedzionośny (Bednarek, 2016) został skruszony w laboratoryjnej kruszarce szczękowej, a następnie przepuszczony przez dezintegrator prętowo-sitowy. Rozdrobniony materiał przesiano na sucho na sicie o oczku 100 μm . Następnie wydzielono reprezentatywne próbki materiału, które poddano flotacji. Testy flotacji przeprowadzono w maszynie Denver typu D12 o pojemności komory 1,5 dm^3 z samozasysającym powietrze wirnikiem. Ilość dozowanego powietrza kontrolowano za pomocą podłączonego do maszyny rotametu. Do każdego eksperymentu użyto roztworu spieniacza C_4P_3 w wodzie wodociągowej o stężeniu 50 mg/dm^3 . Przeprowadzono szereg eksperymentów dla różnych prędkości wirnika: 700, 900, 1100, 1300 i 1500 obrotów/min. Testy przeprowadzono dwukrotnie w celu sprawdzenia powtarzalności wyników.

Nadawę o masie $51 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ umieszczano w komorze flotacyjnej i mieszano przez 1 min w roztworze spieniacza. Następnie doprowadzono powietrze i zbierano ręcznie koncentraty po 1, 3, 8, 15 i 25 minucie trwania procesu. Wraz z ubytkiem cieczy z komory flotacyjnej, uzupełniano ją roztworem używanego spieniacza. Każdy zebrany produkt został zważony, wysuszony i ponownie zważony w celu określenia wychodów masowych wody i suchej masy.

Analizę składu ziarnowego produktów flotacji dla wszystkich pięciu prędkości wirnika przeprowadzono wykorzystując Mastersizer 2000 (Malvern), którego działanie bazuje na dyfrakcji laserowej. W zlewce z wodą, zanurzano głowicę mieszadła aparatu z pompą, następnie dodawano niewielką ilość zawiesiny produktu flotacji (zmętnienie próbki nie może przekroczyć 10%). Rozcieńczona w ten sposób zawiesina była pompowana i przepływała przez celkę pomiarową aparatu. Wiązka lasera odbijała się od cząstek i padała na szereg detektorów ułożonych pod odpowiednimi kątami. Intensywność światła (na danym detektorze) była następnie przeliczana na objętościowy udział poszczególnych frakcji cząstek. W ten sposób otrzymywano rozkład wielkości cząstek. Dodatkowo wyliczono średnice charakteryzujące populację cząstek w postaci mediany rozmiaru (d_{50}) oraz pierwszego (d_{10}) i dziewiątego decyłu (d_{90}). Są to wielkości odpowiadające średnicy, która nie przekracza odpowiednio 50, 10 i 90% populacji (Polowczyk, 2016). Badanie to wykonano dla wszystkich produktów flotacji. Dodatkowo określono skład ziarnowy nadawy. Skład ziarnowy nadawy do flotacji przedstawiono na rys. 1.

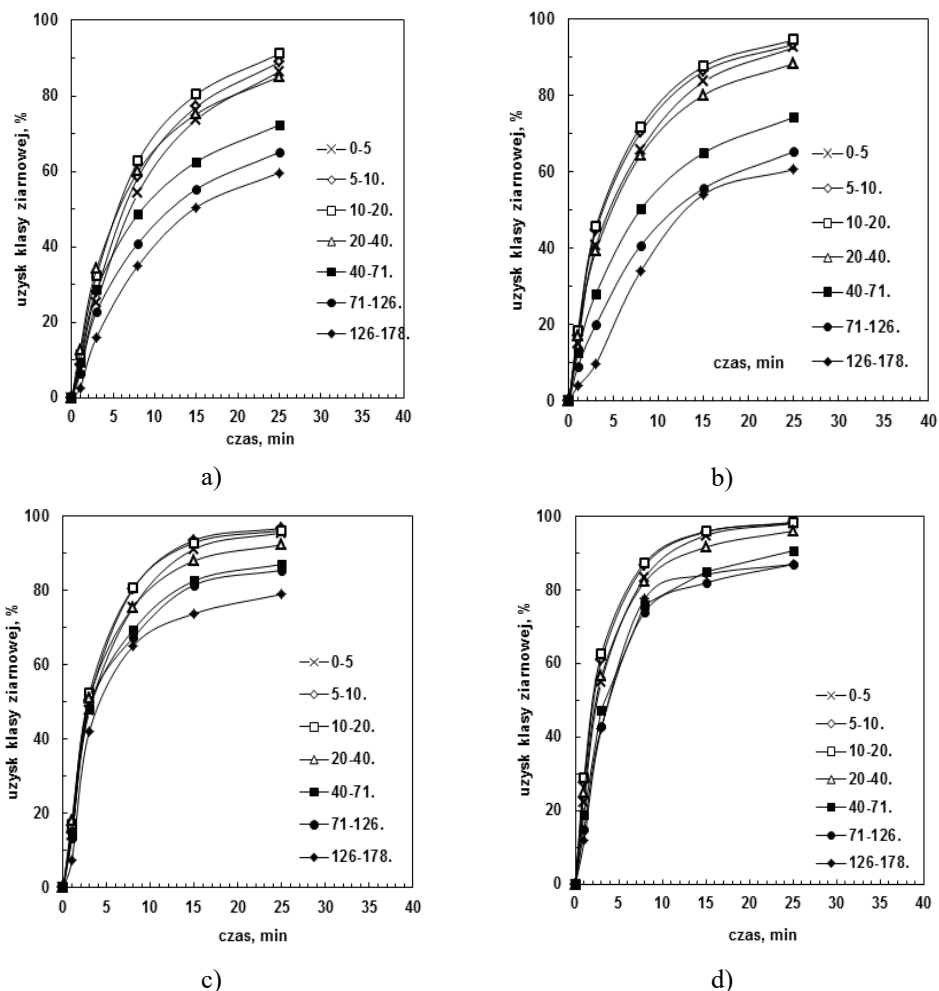


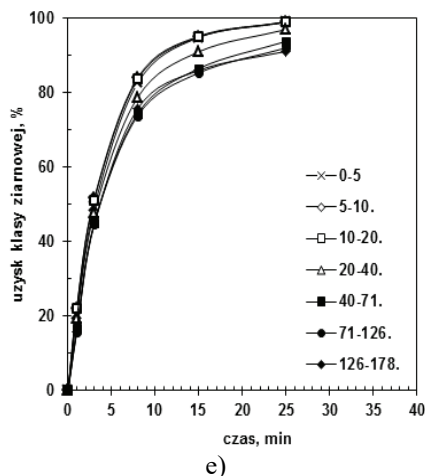
Rys. 1. Skład ziarnowy nadaw do flotacji

W oparciu o zbilansowane wyniki testów flotacji wyznaczono, w programie SigmaPlot 13, kinetykę flotacji poszczególnych klas ziarnowych dla każdej z pięciu prędkości obrotów wirnika. Do wyznaczenia stałej szybkości flotacji wykorzystano równanie, które opisuje kinetykę I rzędu. Do obliczeń w równaniach kinetycznych jako wartości maksymalnych uzysków R_{max} przyjęto uzyski kumulowane każdej klasy ziarnowej dla ostatniego odbieranego produktu. W celu oceny przeprowadzonego procesu flotacji oraz wyznaczenia uzysku miedzi przy poszczególnych prędkościach obrotów wirnika, dokonano oznaczenia zawartości miedzi w każdym z zebranych produktów pięciu flotacji. Zawartość miedzi zmierzono za pomocą fluorescencji rentgenowskiej (XRF) w spektrometrze rentgenowskim EDXRF Epsilon 3X produkcji firmy PANalytical wraz z oprogramowaniem EPSILON 3 SOFTWARE LTU.

Wyniki badań i ich dyskusja

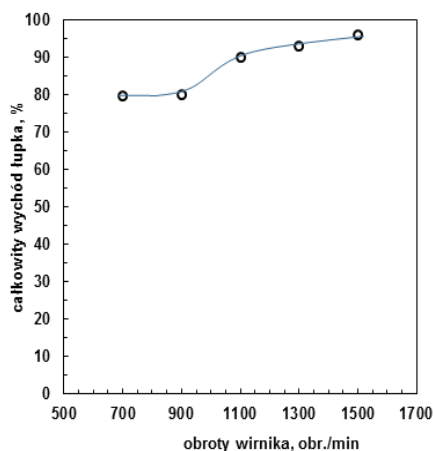
Wyniki flotacji łupka w postaci krzywych kinetycznych uzysk łupka od czasu flotacji dla różnych rozmiarów ziarn łupka i różnych prędkości mieszadła przedstawiono na rys. 2.





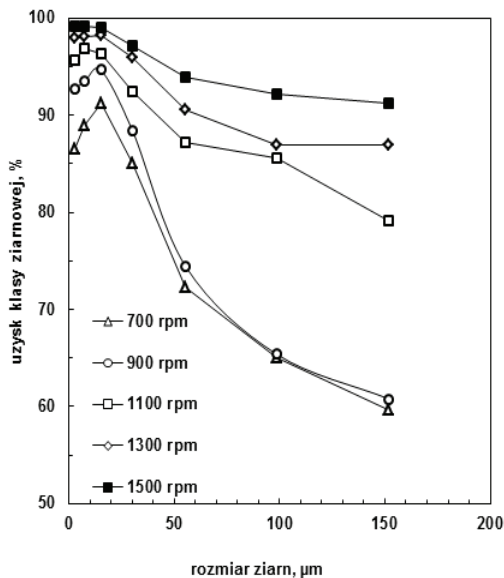
Rys. 2. Uzysk różnych klas ziarnowych łupka w zależności od czasu flotacji przy różnych prędkościach wirnika. a) 700, b) 900, c) 1100, d) 1300, e) 1500 obrotów/min. Stężenie speniacza C4P3 50 mg/dm³. Rozmiar klas ziarnowych podano w μm

W oparciu o bilanse flotacji stwierdzono, że całkowity wychód łupka po 25 minutach flotacji rośnie wraz prędkością wirnika, co pokazano na rys. 3.



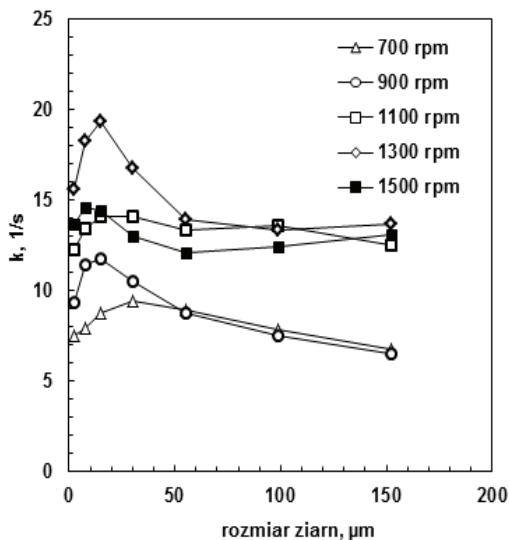
Rys. 3. Całkowity wychód łupka miedzionośnego w zależności od prędkości wirnika (flotacja spieniaczowa, C₄P₃, 50 mg/dm³)

Z kolei z rysunku 4 wynika, że uzysk danej klasy ziarnowej po 25 minutach flotacji zależy od prędkości wirnika z maksimum przy 15 μm . Taki dzwonowy kształt krzywej uzysków od wielkości ziarna jest typowy i został opisany w wielu publikacjach. Położenie maksimum krzywych przy 15 μm jest nietypowe, gdy w wielu pracach maksimum to obserwuje się przy około 35 μm (Jameson, 2012), a nawet więcej (Pease i inni, 2004, Rulyov, 2001). Być może związane jest to z niską naturalną hydrofobowością badanego łupka, który flotowano tylko w obecności speniacza.



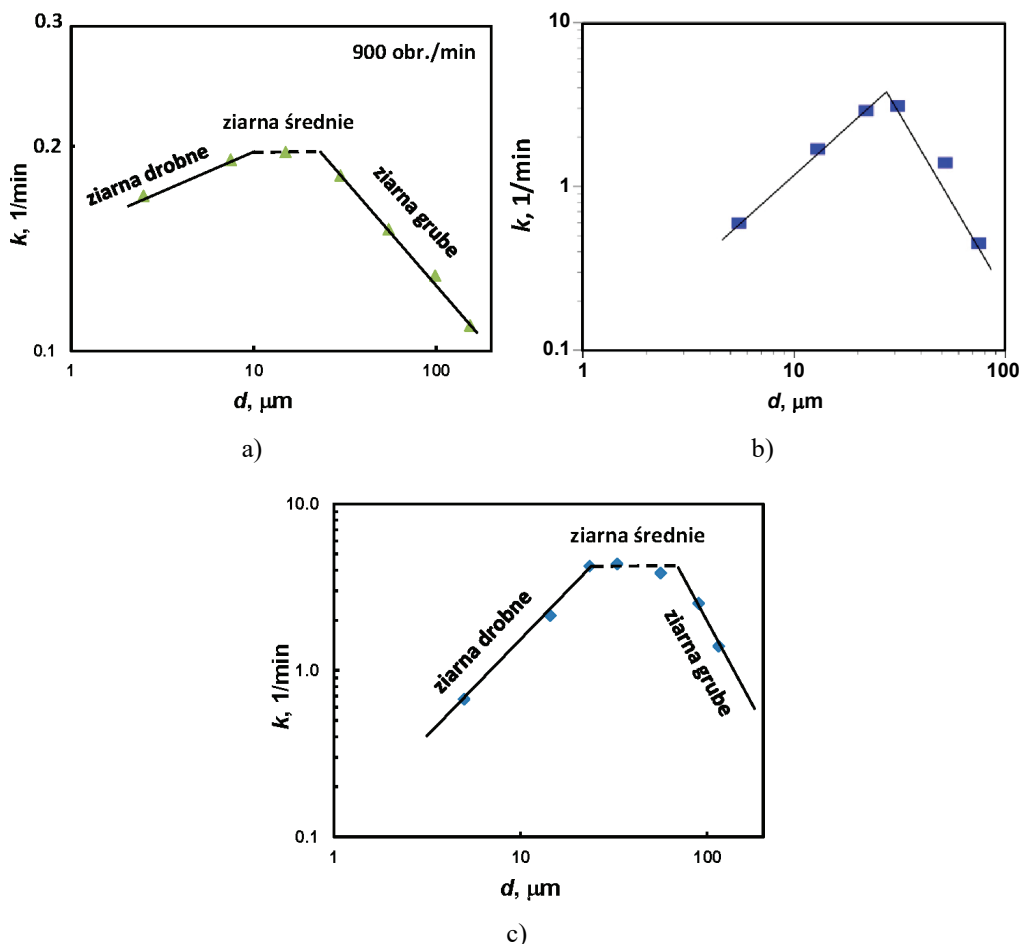
Rys. 4. Uzysk poszczególnych klas ziarnowej łupka po 25 minutach flotacji w zależności od prędkości wirnika w postaci liczby obrotów na min (rpm)

Na podstawie krzywych kinetycznych flotacji łupka można wyznaczyć stałe kinetyczne flotacji I rzędu, które w zależności od rozmiaru flotujących ziarn, dla różnych prędkości wirnika, pokazano na rys. 5.



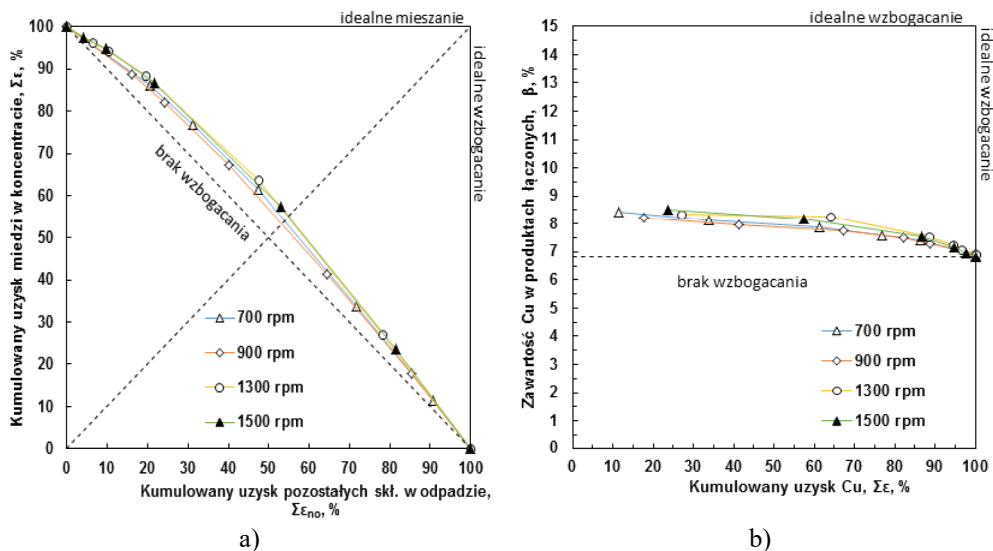
Rys. 5. Zależność stałej szybkości flotacji od rozmiaru ziarn dla różnych prędkości wirnika (obrotów/min = rpm) we flotacji spieniaczowej badanego łupka

Wykreślenie zależności pomiędzy stałą prędkości flotacji k oraz rozmiarem ziarna d dla obu wielkości w skali logarytmicznej (Jameson, 2012) (rys. 6), przykładowo dla 900 obrotów/minutę, wskazuje, że wyróżnić można trzy liniowe zakresy flotacji ziarn: drobne, średnie i grube. Takie ujęcie pozwala na łatwy matematyczny liniowy opis flotacji ziarn w zależności od ich rozmiaru i określenia obszaru optymalnego.



Rys. 6. Zależność stałej kinetycznej flotacji od rozmiaru ziarn (obie skale logarytmiczne). a) dane zawarte w tej pracy, b) Jameson (2012), wg danych Welsby'a i innych, 2010 (punkty pomiarowe i linie aproksymujące są oryginalne), c) te same dane co b) lecz przerysowane, z dodatkowym punktem $d = 115,5 \mu\text{m}$ w oryginale pominiętym

Badany łupek nie był materiałem jednorodnym. Jednakże nie obserwowano znacznego wzbogacania się frakcji flotujących w składniki zawierające miedź. Pokazują to zamieszczone na rys. 7. zarówno krzywe wzbogacania Fuerstenaua (uzysk miedzi od uzysku reszty składników łupka) oraz krzywe wzbogacania Halbicha (zawartość Cu od uzysku Cu) (Drzymała, 2009).



Rys. 7. Krzywe wzbogacania Fuerstenaua (a) i Halbicha (b) dla różnych prędkości obrotowych wirnika (flotacja spieniaczowa bezkolektorowa, stężenia spieniacza C_4P_3 50 mg/dm³)

Podsumowanie

W pracy badano wpływ hydrodynamiki flotacji, regulowanej liczbą obrotów wirnika na jednostkę czasu, na bezkolektorową spieniaczową flotację naturalnie hydrofobowego łupka miedzionośnego pochodzącego z LGOM. Łupek ten jest nośnikiem miedzi i węgla organicznego oraz wielu innych składników. Zależność uzysku od rozmiaru ziarn ma typowy charakter dzwonowy z maksimum dla średnicy ziarn wynoszącej 15 μm . Zwiększanie liczby obrotów wirnika podnosi zarówno wychód flotowanego materiału, jak i uzysk poszczególnych klas ziarnowych oraz wpływa na szybkość flotacji i umożliwia osiągnięcie wyższych uzysków. Stała kinetyczna I rzędu flotacji klas ziarnowych zależy od prędkości obrotowej wirnika, a przy wartości 1300 obrotów na minutę występuje maksimum. Podczas flotacji zachodzi niewielkie wzbogacanie produktów pianowych flotacji w miedź. Proces wzbogacania w miedź był podobny dla wszystkich zastosowanych obrotów wirnika.

Literatura

- BEDNAREK P., 2016. *Wpływ właściwości hydrodynamicznych na flotację ziarn drobnych*, magisterska prac dyplomowa, Przemysław B. Kowalczyk opiekun, Politechnika Wrocławska, WGGG.
- BEDNAREK P., KOWALCZYK P.B., 2014. *Kąt zwilżania łupka miedzionośnego w obecności wybranych spieniaczy*. W: *Łupek miedzionośny*, Drzymała J., Kowalczyk P.B. (red.), WGGG PWiR, Wrocław, 51–55.
- CILEK E.C., YILMAZER B.Z., 2003. *Effects of hydrodynamic parameters on entrainment and flotation performance*, Minerals Engineering, 16, s. 745–756.
- DRZYMAŁA J., 2009. *Podstawy mineralurgii*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- JAMESON G.J., 2012. *The effect of surface liberation and particle size on flotation rate constant*, Minerals Engineering, 36–38, 132–137.

- POŁOWCZYK I., 2016. *Flokulacja łupka miedzionośnego*. W: *Łupek miedzionośny II*, Kowalczyk P.B., Drzymała J. (red.), WGGG PWt, Wrocław, s. 44–49.
- PEASE J.D., YOUNG M.F., CURRY D., JOHNSON M.W., 2004. *Improving fines recovery by grinding finer*, MetPlant, Aus IMM.
- RAO S.R., 2004. *Surface chemistry of froth flotation*, Volume 1: *Fundamentals*, Springer, US.
- RULYOV N., 2001. *Colloidal-hydrodynamic theory of flotation*, Science Direct Working Paper No. S1574-0331(04)70477-4, <https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstractid=2969518>, CPS: physchem/0103026, <http://preprint.chemweb.com/physchem/0103026>.
- WELSBY S.D., VIANNA S.M.S.M., FRAZIDIS J.-P., 2010. *A continuous pilot-scale flotation rig for the systematic study of flotation variables*, Minerals Engineering, 23, 826–829.