

Kazimierz Dąbrowski

Kombinat Górniczo-Hutniczy "Orzeł Biały"
Brzeziny Śląskie

Józef Stachurski

Instytut Przeróbki i Wykorzystania
Surowców Mineralnych
AGH Kraków

PROBLEMY ODTWARZANIA PRZEMYSŁOWYCH PROCESÓW FLOTACJI RUD CYNKOWO-OŁOWIOWYCH W SKALI LABORATORYJNEJ

1. Wstęp

O rozwoju gospodarczym kraju decyduje m.in. tempo rozwoju technologicznego dyktowane przez postęp w tej dziedzinie. W warunkach krajowych ogromne znaczenie dla rozwoju gospodarki ma postęp w zakresie technologii przeróbki kopalin, polegający na ciągłym doskonaleniu istniejących procesów przeróbczych oraz na opracowywaniu i wdrażaniu nowych metod i sposobów wzbogacania.

W obecnej dobie, nowe rozwiązania technologiczne, zwłaszcza dotyczące procesów skomplikowanych, rzadko kiedy są dziełem przypadku. Rozwiązania te są zwykle wynikiem odpowiednio zaprogramowanych i należyście wykonanych badań, co w głównej mierze zależy od stosowania właściwych metod badawczych i od prawidłowej oceny wyników tych badań. Wymienione czynniki warunkują w zasadniczy sposób rozwój technologiczny i wyznaczają tempo tego rozwoju.

W odniesieniu do procesów przeróbki rud metali nieżelaznych, a szczególnie procesów flotacji, opracowanie nowych technologii jest najczęściej rezultatem badań fizykochemicznych, prowadzonych zazwyczaj przy użyciu czystych minerałów. Wyniki tych badań sprawdzane są w skali laboratoryjnej, w warunkach zbliżonych do warunków przemysłowych, przez zastosowanie do eksperymentów flotacyjnych próbek rudy. Program badań laboratoryjnych flotowalności wymienionych próbek z reguły stanowi rozszerzenie badań fizykochemicznych o nowe elementy i rozwiązania technologiczne, opracowane na podstawie wniosków, wynikających z dotychczasowych prac badawczych nad przeróbką rudy.

Jak dotychczas, wyniki badań laboratoryjnych nie są uznawane w pełni za miarodajne, dlatego sprawdza się je, prowadząc próby ćwierć

i półtechniczne oraz przemysłowe. Ten cykl badań obejmuje zwłaszcza nowe technologie, których wdrożenie na podstawie wyników tylko prób laboratoryjnych mogłoby stanowić duże ryzyko. Wiadomo, że próby ćwierć i półtechniczne są kosztowne i znacznie przedłużają badania. Stąd też proste rozwiązania technologiczne, których zastosowanie wiąże się z małym ryzykiem, sprawdzone są na podstawie wyników badań laboratoryjnych - bezpośrednio w skali przemysłowej.

W niniejszej pracy wykazano, że wskaźniki technologiczne różnych procesów przeróbki rud cynkowo-ołowiowych, a zwłaszcza wskaźniki wzbogacania, można należycie wyznaczyć już na podstawie wyników badań laboratoryjnych. Wymaga to przeprowadzenia prób cyklicznych, polegających na wykonaniu doświadczeń w sposób ciągły [13], [15]. Wymienione próby umożliwiają odtworzenie przemysłowych procesów przeróbki rud w skali laboratoryjnej. Za pomocą prób cyklicznych można nie tylko odtwarzać w laboratorium stosowane w przemyśle procesy przerobowe, ale próby te stwarzają także możliwość projektowania nowych technologii i zakładów przerobowych już na podstawie wyników badań laboratoryjnych. Ma to ogromne znaczenie, gdyż eliminuje kłopotliwe i kosztowne próby ćwierć i półtechniczne oraz poważnie skraca cykl badań.

Choć tematyka Sympozjum obejmuje w zasadzie fizykochemiczne procesy przeróbki kopalin, to jednak w ramach niniejszej pracy zwrócono także uwagę na procesy wzbogacania wstępnego w cieczach ciężkich, należących do procesów fizycznych [16]. Te ostatnie mają duże znaczenie przy przerobie rud Zn - Pb dlatego warto je uwzględnić, omawiając problemy skali badań i oceny procesów przeróbki tych rud. Zaadsorbowany na dolomicie cynk [6] może w istotny sposób rzutować na straty tego metalu w odpadach wzbogacania wstępnego.

W pracach badawczych nad procesami przeróbki rud metali nieżelaznych, poza stosowaniem odpowiednich metod eksperymentalnych, nie mniejsze znaczenie ma właściwa ocena wyników prób. Brak należytego rozpoznania tego zagadnienia, stosowanie różnych sposobów oceny wyników wzbogacania oraz występujący w tym zakresie dowolność, a czasem nawet tendencyjność w interpretacji wyników sprawiają, że w wielu przypadkach wyciągnięte wnioski z badań są fałszywe. To zaś nie stwarza dobrego klimatu dla wdrożeń.

Dla zobrazowania powyższej kwestii warto podkreślić, że przy wzbogacaniu rud przyrost uzysku metalu w koncentracie np. o 1% może tylko w jednym zakładzie przerobowym w zależności od wielkości przerobu, przynieść efekt ekonomiczny rzędu kilku lub kilkunastu milionów złotych na rok. Jednak należyte wykazanie przyrostu uzysku tego metalu stanowić może nie lada problem, jeżeli uwzględni się wskaźnik uzysku

jest funkcją nie tylko danej technologii ale zależy on także od zawartości metalu w nadawie i w koncentracie oraz od stopnia utlenienia tego metalu. Gdy zaś weźmie się dodatkowo pod uwagę błędy popełnione przy oznaczaniu zwłaszcza niskich zawartości metali w rudzie i produktach wzbogacania, które w dużej mierze rzutują na wielkość obliczonego uzysku [18], oraz gdy uwzględni się w bilansie metali ich "nieuchwytność" [4], można wyrobić sobie pogląd, jak skomplikowanym i nader złożonym zagadnieniem jest ocena wyników pób. Bardzo często należyte jej wykonanie wymaga uzupełniających badań.

Mając to na uwadze, w niniejszej pracy omówiono zagadnienia związane z odtwarzaniem przemysłowym procesu flotacji rud Zn - Pb w skali laboratoryjnej, za pomocą prób cyklicznych, jak również przedstawiono niektóre wyniki badań własnych w tym zakresie. Przedstawiono także ważniejsze wyniki badań nad oceną technologiczną procesów przerobczych, ściśle powiązanych z odtwarzaniem tych procesów w laboratorium. Poruszono również wybrane zagadnienia z zakresu nowych technologii wzbogacania rud Zn - Pb opracowanych na podstawie prób laboratoryjnych i przemysłowych. Wyniki tych badań stanowią treść prac ZBiD KGH "Orzeł Biały" [1-5], [8], które były przedmiotem komisijnego odbioru przez JMN.

2. Próby cykliczne

Stosowane powszechnie w badaniach laboratoryjnych próby flotacji w cyklu otwartym nie odtwarzają w pełni złożonych procesów, zachodzących w skali przemysłowej. Próby te nie obejmują flotacji zawrotów, tj. produktów przejściowych, stanowiących np. odpady flotacyjnego oczyszczania koncentratu surowego, bądź też koncentraty z flotacji uzupełniającej i kontrolnej.

W warunkach przemysłowych wymienione produkty kierowane są do ponownego wzbogacania w procesie flotacji surowej lub oczyszczającej, gdzie rozprowadzane są do koncentratu i odpadów. Zawartość flotowanego minerału w tych produktach jest znacznie niższa niż w koncentracie i zwykle wyższa od zawartości tego minerału w odpadach końcowych. Dlatego zawrócenie produktów przejściowych do ponownej flotacji powoduje z reguły pogorszenie jakości koncentratu oraz wzrost metalu w odpadach końcowych, na skutek wzrostu wychodu tych odpadów i ewentualnego zwiększenia się w nich zawartości wymienionego metalu.

Stąd też otrzymane za pomocą prób flotacji w cyklu otwartym wyniki wzbogacania rudy (uzysk i jakość koncentratu) nie pokrywają się

z wynikami uzyskiwanymi w warunkach przemysłowych, nawet przy użyciu identycznych flotowników i przy jednakowych warunkach flotacji. Próby te można jedynie stosować do odwzorowania prostych procesów oraz do wstępnego rozpoznania flotowalności rudy i do określenia wstępnych warunków jej flotacji. Za pomocą tych prób można także w przybliżeniu wyznaczyć wpływ różnych czynników na wyniki flotacji, np. wpływ pH mętów, zużycia odczynników, sposobu ich dozowania itp. Szczegółowe badania flotacyjne powinny zawierać dokładne wyniki wzbogacania, co jest konieczne do zaprojektowania zakładu przerobczego i oceny nowych rozwiązań technologicznych. W takim przypadku wyniki prób flotacji w cyklu otwartym uzupełniane są wynikami flotacji ciągłej w skali świerc lub półtechnicznej, przy użyciu wielokomorowych zespołów flotowników. Ostateczne uściślenie wyników otrzymuje się po przeprowadzeniu prób przemysłowych.

Niedogodności prowadzenia prób świerc i półtechnicznych oraz przemysłowych podkreślono na wstępie. W uzupełnieniu należy dodać, że w przypadku braku urządzeń do przeprowadzania tych prób, wyznaczenie wskaźników wzbogacania zwłaszcza nowych procesów przerobczych może stanowić poważny problem techniczny.

W świetle powyższego wyłania się zagadnienie należytego wyznaczenia wymienionych wskaźników nowych technologii już na etapie badań laboratoryjnych. Jest to możliwe wtedy, gdy w warunkach laboratoryjnych zostaną osiągnięte takie wyniki flotacji, jakie osiągnięto by po wdrożeniu tych technologii w przemyśle. Powyższe zagadnienie sprowadza się więc do odtworzenia przemysłowego procesu flotacji w skali laboratoryjnej. Jeżeli przy zastosowaniu określonej metodyki badań istnieje możliwość odtworzenia w skali laboratoryjnej np. stosowanego w przemyśle procesu flotacji selektywnej, to można mieć pewność, że opracowana przy pomocy tej metodyki badań nowa technologia flotacji sprawdzi się w warunkach przemysłowych.

Odtworzenie przemysłowego procesu flotacji w skali laboratoryjnej uzyskuje się przez odwzorowanie w laboratorium tej flotacji jako procesu ciągłego. Jak wiadomo, można to osiągnąć za pomocą flotacji cyklicznej, stanowiącej proces "quasiciągły". Próby prowadzenia tego procesu określa się również jako próby flotacji w cyklu zamkniętym. Liczni badacze praktykują różny sposób flotacji cyklicznej, co nie pozostaje bez wpływu na wyniki wzbogacania. Dlatego wyniki prób cyklicznych, jak dotąd nie cieszą się pełnym zaufaniem, zwłaszcza w odniesieniu do rud polimetalicznych, z których otrzymuje się na drodze flotacji kilka koncentratów. Okazuje się bowiem, że odtworzenie w skali laboratoryjnej przemysłowego procesu flotacji rud polimetalicz-

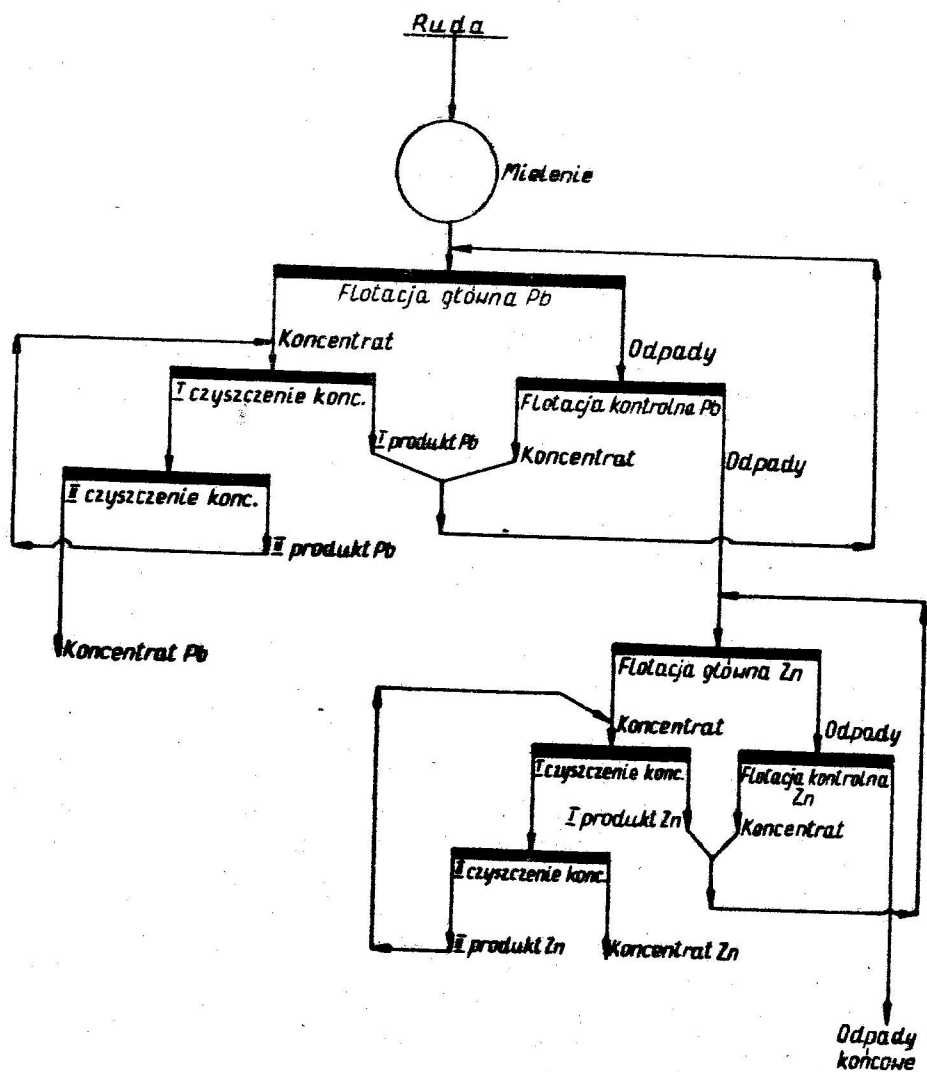
nych jest znacznie trudniejsze i bardziej pracochłonne, niż odtworzenie flotacji rud monometalicznych.

W pracach laboratoryjnych w zakresie odtworzenia flotacji ciągłej zasadniczą rolę odgrywa sposób przeprowadzenia eksperymentu. Wiadomo, że z jednej i tej samej rudy, przy zachowaniu jednakowych parametrów procesu (uziarnienie, gęstość mętów, aeracja itd.) oraz przy jednakowym sposobie dodawania odczynników, w zależności od niektórych szczegółów wykonania eksperymentu, można otrzymać kilka różnych wyników. Rozbieżności te będą jeszcze większe, gdy wprowadzi się różne sposoby obliczania wyników flotacji, tj. sporządzania bilansów metali. Dlatego w pracach nad odwzorowaniem flotacji ciągłej pierwszorzędne znaczenie ma określenie odpowiedniej metodyki prowadzenia eksperymentu, jak również stosowanie prawidłowej metody sporządzania bilansów metali i właściwego sposobu ich oceny. Rozpoznawanie tego zagadnienia oraz ujednolicenie metodyki badań w tym zakresie, może w dużym stopniu zwiększyć zaufanie do wyników prób cyklicznych.

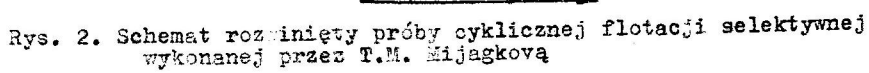
Jak wiadomo, metoda wyznaczania ostatecznych wyników flotacji rudy za pomocą prób cyklicznych jest powszechnie stosowana w ZSRR, zwłaszcza przez instytut "Mechanobr" w Leningradzie. Ten sposób określania wyników flotacji rud znajduje coraz to większe zastosowanie w kraju. Pierwsze szczegółowe badania w zakresie flotacji cyklicznej rud cynkowo-ołowiowych podjęły H.J. Kurdiakowa i T.M. Mijagkova [13].

Na rys. 1 przedstawiono schemat jakościowy próby cyklicznej flotacji selektywnej rudy Zn - Pb przeprowadzonej przez T.M. Mijagkową. Sposób wykonania tej próby przedstawiono zaś graficznie na rys. 2. Zgodnie z rys. 2 produkty przejściowe flotacji galeny z pierwszej naważki, tj. próbki rudy, kierowane są odpowiednio do flotacji głównej i oczyszczającej w trakcie flotacji drugiej naważki. Produkty przejściowe flotacji galeny z drugiej naważki wprowadzane są do flotacji galeny z trzeciej naważki itd., aż do momentu, gdy proces flotacji galeny się ustali, tzn. gdy zawartość Pb w odpadach z flotacji galeny będzie w przybliżeniu stała i gdy wychód tych odpadów będzie wykazywał wielkość stałą.

Przy flotacji selektywnej rudy ustalenie się procesu flotacji galeny na miejsce w trakcie flotacji trzeciej lub czwartej naważki, a przy flotacji piątej naważki można mieć pewność, że proces ten ustalił się. Wtedy zgodnie ze schematem na rys. 2 przystępuje się do flotacji blendy cynkowej, postępując tak samo, jak przy flotacji galeny, aż do ustalenia się procesu; po ustaleniu się tego procesu można dopiero przerwać. Jeżeli po flotacji blendy trzeba jeszcze prowadzić flotację markazytu, rozpoczyna się dopiero po ustaleniu się procesu flotacji blendy.



Rys. 1. Schemat jakościowy próby flotacji selektywnej rudy Zn i Pb w cyklu zamkniętym



Rys. 2. Schemat rozwinęty próby cyklicznej flotacji selektywnej wykonanej przez T.M. Mijagkovą

Po przeprowadzeniu próby cyklicznej produkty flotacji wszystkich naważek po wysuszeniu waży się, a następnie oznacza się w nich zawartość metali. Dla zmniejszenia analiz chemicznych można nie oznaczać zawartości metali w końcowych produktach pierwszych naważek.

W celu sporządzenia bilansu metali bierze się do obliczeń końcowe produkty z flotacji ostatniej naważki (koncentraty i odpady), przyjmując ich masę za 100%; produktów przejściowych nie uwzględnia się w bilansie. Aby bilans metali uznać za miarodajny należy stwierdzić, że proces się ustalił. Ustalenie się procesu wystąpiło jeżeli:

- masa końcowych produktów z flotacji ostatniej naważki jest równa masie tej naważki, stanowiącej nadawę do flotacji,
- wychody i zawartości metali w końcowych produktach z flotacji ostatnich dwóch lub trzech naważek są odpowiednio stałe.

Poza tym, zawartość metali w nadawie do flotacji obliczona na podstawie zawartości tych metali w produktach końcowych, powinna odpowiadać ich zawartości w próbce rudy, stanowiącej nadawę do próby cyklicznej. W trakcie analizy wyników flotacji z reguły stwierdza się wyższą jakość koncentratów z flotacji pierwszych naważek, jak również niższy wychód tych koncentratów i niższy uzysk metali w porównaniu z jakością tych koncentratów, ich wychodem i uzyskami metali z flotacji końcowych naważek. Jest to zrozumiałe, ponieważ do koncentratów ostatnich naważek przechodzą produkty przejściowe, niosące nie tylko minerały użyteczne ale także zanieczyszczenia powodujące obniżenie jakości koncentratu i zwiększenie jego wychodu.

Godny uwagi jest także sposób dozowania odczynników flotacyjnych przy wprowadzeniu prób cyklicznych. Wiadomo, że produkty przejściowe niosą ze sobą pewną ilość odczynników. Dlatego do flotacji trzeciej, czwartej i następnych naważek można wprowadzać nieco mniej odczynników. Zużycie odczynników powinno się zaś określać na podstawie ich dawki do flotacji ostatniej naważki.

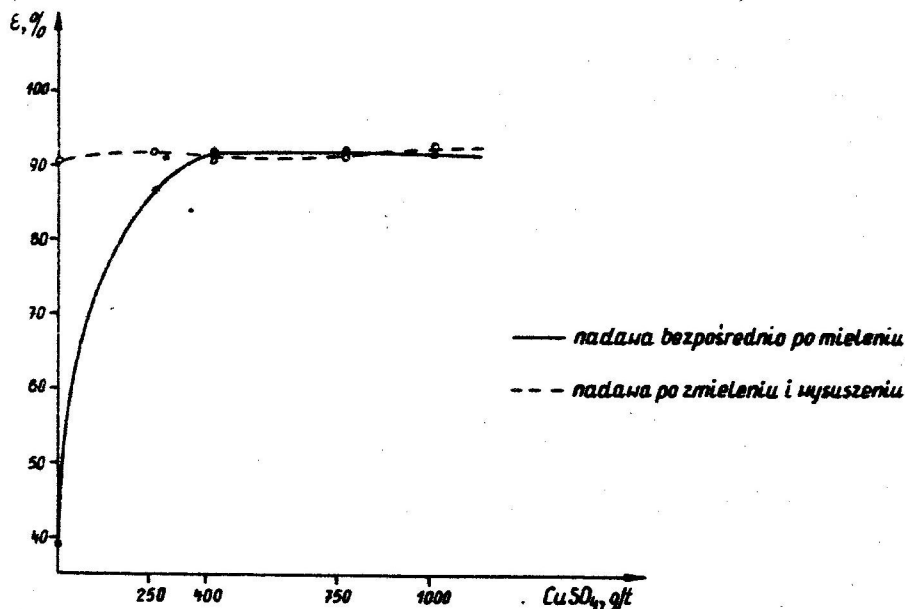
Warto dodać, że próby cykliczne można stosować nie tylko w zakresie flotacji rudy, ale próby te mogą być także stosowane do odtworzenia w skali laboratoryjnej przemysłowych procesów wzbogacania grawitacyjnego, magnetycznego itp. Często próby cykliczne obejmują tą część schematu technologicznego, gdzie występuje zawracanie produktów przejściowych do ponownego wzbogacania w poprzednich operacjach przerobczych.

Praktyka instytutu "Mechanobr" wykazała, że wyznaczone za pomocą prób cyklicznych wskaźniki technologiczne w zupełności odtwarzają się w warunkach przemysłowych, co jak już podkreślono ma bardzo duże znaczenie w pracach badawczych.

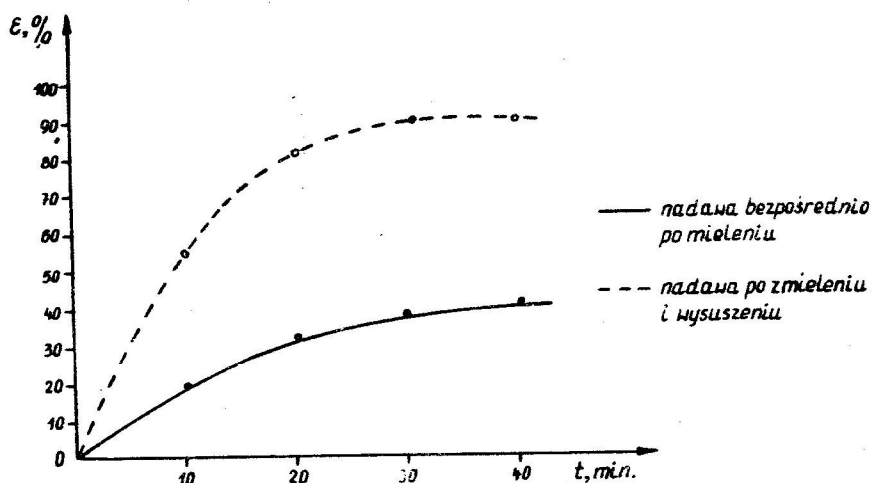
Dotychczasowe własne doświadczenia w zakresie prowadzenia prób cyklicznych wykazują, że istotne znaczenie dla odtwarzania przemysłowego procesu flotacji rud Zn - Pb w skali laboratoryjnej ma zachowanie własności fizykochemicznych powierzchni minerałów. Długotrwałe przechowywanie rudy, zwłaszcza w pomieszczeniach ogrzewanych, powoduje duże utlenienie metali, szczególnie ołowiu, co znacznie obniża uzysk tego metalu.

Niezależnie od powyższego, intensywne suszenie rudy np. w suszarce, zwłaszcza rudy zmielonej, powoduje duże uaktywnienie flotacji blendy. Zjawisko to charakteryzują wykresy na rys. 3, obrazujące zależność uzysku Zn w surowym koncentracie kolektywnym, po 40 min. flotacji, od zużycia CuSO_4 do flotacji rudy świeżo zmielonej i rudy wysuszonej po mieleniu.

Z rys. 3. wynika, że w zakresie niskiego zużycia CuSO_4 istnieje duża różnica pomiędzy uzyskami Zn z flotacji wymienionych rud. Im mniejsze zużycie CuSO_4 do flotacji, tym różnica ta jest większa - zanika ona dopiero przy zużyciu CuSO_4 , wynoszącym ok. 400 g/t nadawy. Wykresy na rys. 3 wykazują także, że przy odpowiednio długim czasie flotacji można wyflotować z rudy wysuszonej po mieleniu z zadawalającym uzyskiem Zn, blendę cynkową, nie stosując do flotacji CuSO_4 .



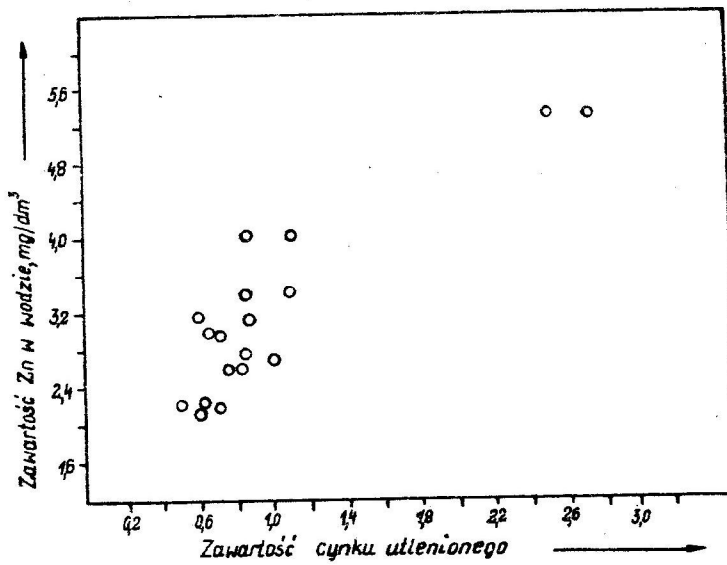
Rys. 3. Zależność uzysku Zn w surowym koncentracie kolektywnym po 40 min. flotacji, od zużycia CuSO_4 do flotacji rudy świeżo zmielonej i rudy wysuszonej po mieleniu



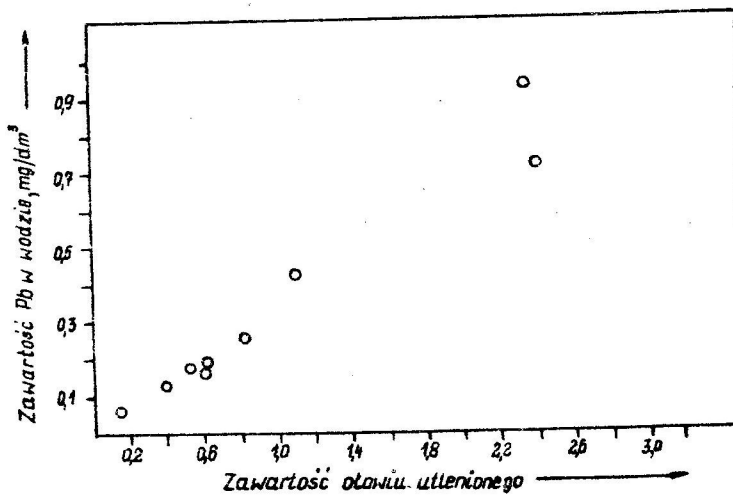
Rys. 4^o Kinetyka flotacji minerałów Zn w próbkach flotacji kolektywnej rudy świeżo zmielonej i rudy wysuszonej po mieleniu - bez dodatku CuSO_4 i przy pH mętów flotacyjnych 10

Do takiego samego wniosku dochodzi się na podstawie wykresów na rys. 4. Te ostatnie informują również, że przy flotacji bez użycia CuSO_4 , różnica uzysków Zn z flotacji rudy świeżo zmielonej i wysuszonej po mieleniu zwiększa się w miarę upływu czasu flotacji. Inne przedstawione w pracy [8] wyniki badań wykazały, iż naturalna flotowalność blendy cynkowej, tj. bez użycia CuSO_4 z nadawy wysuszonej po mieleniu jest różna w odniesieniu do rud z różnych partii złoża. Flotowalność ta zależy również od pH mętów - ulega ona zmniejszeniu przy wzroście wskaźnika.

Uaktywnienie flotacji blendy z rudy wysuszonej można przypisać częściowemu utlenieniu powierzchni tego minerału, co powoduje jego hydrofobizację. Ponadto zjawisko to może być wywołane także uaktywnieniem blendy cynkowej przez jony metali ciężkich, w tym także przez jony ołowiane [20]. Wymienione jony pochodzą z rozkładu zawartych w rudzie rozpuszczalnych soli, głównie siarczanów, co szczególnie ma miejsce przy wzbogacaniu rudy w dużym stopniu utlenionej. Na słuszność tego poglądu wskazuje rys. 6, pokazujący wzrost zawartości ołowiu w wodzie z przemycania rudy Zn - Pb, w miarę wzrostu zawartości ołowiu utlenionego w tej rudzie. Zwiększenie zawartości Pb/O w rudzie wiąże się ze wzrostem stopnia utlenienia ołowiu, spowodowanym dłu-



Rys. 5. Zależność zawartości Zn w wodzie z przemysławania rudy od zawartości cynku utlenionego w tej rudzie



Rys. 6. Zależność zawartości Pb w wodzie z przemysławania rudy od zawartości ołowiu utlenionego w tej rudzie

gotrwałym przechowywaniem tej rudy lub intensywnym jej suszeniem.

Z drugiej strony suszenie rudy powoduje nie tylko utlenienie ołowiu, ale także cynku, co również prowadzi do wzrostu zawartości tego metalu w wódzie z przemycania rudy (rys. 5).

Powstały podczas utlenienia rudy $ZnSO_4$ powinien deppesować blendę cynkową gdyż jak wiadomo dodatek tego odczynnika do flotacji galeny wywołuje zmniejszenie zawartości Zn w koncentracie galenowym, na skutek depresji blendy. Ale inne wyniki badań [20] wskazują na wzrost adsorpcji ksantogenianu na sfalerycie (główny składnik blendy cynkowej) w obecności jonów cynkowych, pochodzących z rozkładu $ZnSO_4$.

Opisane zjawiska uaktywnienia flotacji blendy z rudy wysuszonej ma duże znaczenie przy prowadzeniu prób cyklicznych flotacji, a szczególnie flotacji selektywnej. W warunkach krajowych z reguły rudę kieruje się do wzbogacania bezpośrednio po jej wydobyciu. Suszenie tej rudy przed flotacją, a zwłaszcza rudy zmielonej sprawia, że w trakcie prowadzenia prób laboratoryjnych proces flotacji galeny jest zakłócony intensywną flotacją blendy. Z jednej strony wpływa to ujemnie na uzysk Pb (intensywnie flotująca blenda tłumi flotację galeny), a z drugiej, poważnie przeszkadza w otrzymaniu koncentratu galenowego o odpowiedniej jakości. Zanieczyszczenie koncentratu galenowego blendą cynkową powoduje zaś spadek uzysku Zn w koncentracie blendowym. Z powyższego wynika, że użycie do prób cyklicznych np. wysuszonej próbki zmielonej w zakładzie przerobczym nadawy flotacyjnej uniemożliwia odtworzenie przemysłowego procesu flotacji rudy w skali laboratoryjnej, co co zostało stwierdzone doświadczalnie.

Godny uwagi jest także wpływ temperatury na wyniki flotacji blendy. Badania własne [8] wykazały, że podgrzewanie mętów w trakcie flotacji blendy do temperatury 22-23 °C powoduje przyrost uzysku Zn w koncentracie blendowym. Ponadto z literatury wiadomo [12], że wyższa temperatura mętów wywołuje inne pozytywne zjawiska jak: poprawę wyników flotacji szlamów, zmniejszenie zużycia odczynników, skrócenie czasu flotacji itp. Dlatego prowadząc w warunkach laboratoryjnych, w temperaturze pokojowej, odwzorowanie przemysłowego procesu flotacji blendy w podwyższonej temperaturze, otrzymuje się w skali laboratoryjnej nieco gorsze wyniki technologiczne niż w skali przemysłowej. Stąd też czynnik temperatury powinien być odpowiednio uwzględniany przy prowadzeniu i ocenie prób cyklicznych flotacji rudy Zn -Pb.

Ważnym czynnikiem jest także zachowanie składu jonowego mętów flotacyjnych. Mielenie rudy w skali laboratoryjnej, zwłaszcza domielanie klas grubych, wydzielonych z produktu mielenia przez przesiewanie go na mokro, może powodować duże zużycie wody, jak również

konieczność odprowadzenia jej z nadawy do flotacji przez dekantację. Na skutek takiego postępowania składy jonowe mętów flotacyjnych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych mogą się znacznie różnić, co może prowadzić do rozbieżności wyników flotacji. Podobne zjawisko może mieć miejsce przy regulacji poziomu mętów w komorze maszynki flotacyjnej za pomocą wody. Zapobiega temu w dużej mierze zastosowanie do regulacji pojemności komory pływaka zanurzonego w mętach [8].

Bardzo duże znaczenie ma również należyte uśrednienie rudy, stanowiącej nadawę do próby cyklicznej, co nie zawsze można zrealizować w odniesieniu do poszczególnych naważek, (zwłaszcza w zakresie zawartości Pb i stopnia utlenienia tego metalu. Wpływa to w określony sposób na wyniki flotacji galeny. Dlatego przy sporządzaniu bilansów metali prób cyklicznych, konieczne jest uwzględnienie kilku naważek po ustaleniu się procesu flotacji, tj. obliczenie średnich wyników z flotacji tych naważek.

Wreszcie bardzo dużą rolę w próbach cyklicznych odgrywa czynnik ludzki, jak również należyty sprzęt laboratoryjny. Warto dodać, że próby cykliczne flotacji rudy Zn - Pb są często pracochłonne, długotrwałe i wymagają odpowiedniej organizacji pracy.

Poza tym zaobserwowano, że przy flotacji selektywnej galeny i blendy z koncentratu kolektywnego proces flotacji tych minerałów ustala się znacznie wcześniej, niż przy flotacji selektywnej rudy. Zauważono także, że w trakcie flotacji selektywnej ustalenie się procesu flotacji markazytu przebiega opornie, co wymagać może flotacji większej ilości naważek.

Przeprowadzono liczne próby cykliczne flotacji rudy Zn - Pb według następujących technologii:

- flotacja selektywna, w której przy flotacji surowej blendy pH mętów wynosiło 10,5, a oczyszczenie koncentratu blendowego prowadzono przy pH = 11,

- flotacja selektywna, w której w trakcie flotacji surowej blendy i oczyszczania koncentratu blendowego pH mętów było naturalne (ok. 8)

- nie stosowano wapna hydratyzowanego,

- flotacja selektywna galeny oraz kolektywno-selektywna blendy i markazytu (technologia obecnie stosowana w zakładzie "Marchlewski"),

- flotacja kolektywno-selektywna Pb - Zn - Fe, polegająca na flotacji kolektywnej galeny, blendy i markazytu oraz na wydzieleniu tych minerałów z koncentratu kolektywnego metodą flotacji selektywnej [14],

- flotacja kolektywna szlamów i selektywna piasków wspólnie z koncentratem kolektywnym z flotacji szlamów,

- flotacja kolektywna szlamów i wspólna flotacja selektywna galeny z piasków i z koncentratu kolektywnego, a następnie flotacja kolektywno-selektywna blendy i markazytu.

Łatwo zauważyć, że przedmiotem badań były tylko nowe technologie flotacji rudy, ale także technologie dotychczas znane i stosowane. Te ostatnie badane w celach porównawczych. Szczegółowy opis wymienionych technologii podano w pracy [8].

Przeprowadzone badania wykazały możliwość odtworzenia przemysłowych procesów flotacji rud Zn - Pb w skali laboratoryjnej, za pomocą prób cyklicznych. Na podstawie tych prób wykazano także, że flotacja blendy cynkowej prowadzona przy naturalnym pH mętów przebiega znacznie lepiej, niż przy pH 10,5. Prowadząc ten proces przy naturalnym pH otrzymano widoczną poprawę jakości koncentratu blendowego, przy nieco wyższym uzysku Zn, co jest zgodne z innymi wynikami badań w tym zakresie [9-11]. Próby cykliczne potwierdziły również przewagę flotacji kolektywno-selektywnej blendy i markazytu nad flotacją selektywną tych minerałów. Stanowi to potwierdzenie wyników badań JEM [17], uzyskanych m.in. na podstawie prób przemysłowych.

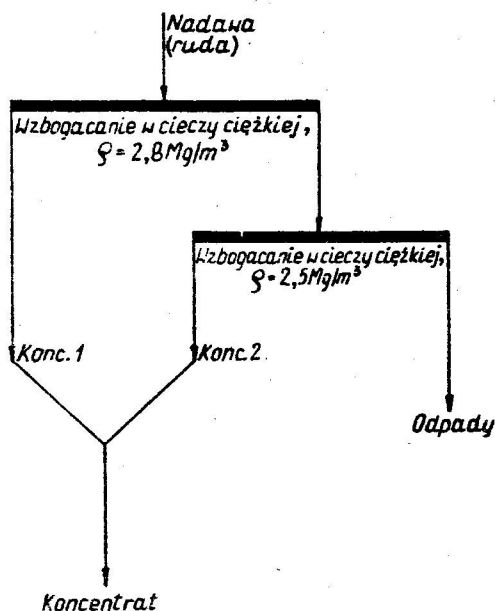
Godne uwagi jest, że za pomocą prób cyklicznych wykazano, iż wdrożenie nowej technologii flotacji kolektywno-selektywnej Zn-Pb-Ps rokuje bardzo dużą poprawę jakości koncentratów, przy zachowaniu uzysków metali na dotychczasowym poziomie. Zastosowanie tego sposobu wzbogacania pozwoli dodatkowo na znaczne skrócenie czasu flotacji, co jest równoznaczne ze zmniejszeniem kosztów przerobu rudy.

3. Próby w cyklu otwartym

Jak wiadomo, próby cykliczne, tj. w cyklu zamkniętym, służą do odziorowania w skali laboratoryjnej złożonych procesów przerobowych, w których produkty przejściowe zwracane są do ponownego przerobu w poprzednich operacjach technologicznych. W trakcie przeróbki rud Zn-Pb mogą jednak występować niektóre procesy, w których nie ma miejsca ponowny przerób produktów przejściowych. Procesy te zwykle wchodzi w skład procesu bardziej złożonego, obejmującego pełny cykl przerobczy lub jego część. Można do nich zaliczyć np. proces flotacji kolektywnej bez zaworów, jako proces wchodzący w skład flotacji kolektywno-selektywnej. Przykładem może być także proces wzbogacania wstępnego rudy w cieczach ciężkich, jeżeli nie obejmuje on ponownego wzbogacania produktów przejściowych. Łatwo zauważyć, że wymienione procesy można odtworzyć w skali laboratoryjnej za pomocą prób w cyklu otwartym.

Słuszność powyższego poglądu potwierdzają wyniki szczegółowych badań ZBiD KGH "Orzeł Biały" nad wzbogacaniem wstępnym siarczkowej rudy Zn-Pb w cieczach ciężkich [1]. Przeprowadzone w tym zakresie próby laboratoryjne (analizy densymetryczne) i próby przemysłowe wzbogacania rudy w separatorze zawieszinowym Disa-1400 wykazały bardzo dużą zgodność wyników, zwłaszcza w odniesieniu do wskaźników Zn. Ponadto wyniki prób przemysłowych sprawdziły się całkowicie w warunkach ruchowych, po modernizacji zakładu przerobczego [2].

Dalszym potwierdzeniem możliwości odtwarzania niektórych procesów przerobczych w skali laboratoryjnej, za pomocą prób w cyklu otwartym, są wyniki badań nad wzbogacaniem wstępnym rud galmanowych w cieczach ciężkich [3],[6],[7]. Próby laboratoryjne i przemysłowe wzbogacania wstępnego rudy galmanowej prowadzono według schematu na rys. 7. Zgodnie ze schematem, wydzielone z rudy klasy ziarnowe poddawano dwustopniowemu wzbogacaniu w cieczach ciężkich. Taki sposób wzbogacania podyktowany jest stosunkowo dużym zubożeniem frakcji $2,5-2,8 \text{ Mg/m}^3$, w porównaniu z frakcjami $-2,5 \text{ Mg/m}^3$ i $+2,8 \text{ Mg/m}^3$. Podobne zjawisko występuje przy wzbogacaniu rud siarczkowych i mieszanych (zob. rys. 10), ale w zakresie rud galmanowych nabiera ono znacznie większej wyrazistości.



7. Schemat jakościowy prób wzbogacania rudy galmanowej w cieczach ciężkich

Próby laboratoryjne wykonano przy użyciu jednorodnych cieczy ciężkich (bromoform, tetrabromoetan). Jak wynika ze schematu na rys. 7, z I stopnia wzbogacania, które prowadzono w cieczy ciężkiej o gęstości $2,8 \text{ Mg/m}^3$ otrzymano 2 produkty: tonący i pływający. Produkt tonący stanowił koncentrat 1, a produkt pływający kierowano do II stopnia wzbogacania, które prowadzono w cieczy ciężkiej o gęstości $2,5 \text{ Mg/m}^3$. Produkt tonący II stopnia wzbogacania traktowano jako odpady (dolomit), a produkt pływający - jako koncentrat 2. Wzbogacano osobno klasy grube ($+10 \text{ mm}$) i drobne ($10-2 \text{ mm}$). Ze wzbogacania wstępnego grubych klas ziarnowych otrzymano 26% odpadów, w odniesieniu do rudy surowej, o zawartości 2,1% Zn (średnie z 6 prób); zawartość Zn w rudzie wynosiła 5,9%. Łączny wychód odpadów ze wzbogacania grubych i drobnych klas ziarnowych wynosił ok. 37%.

Pozytywne rezultaty badań laboratoryjnych stanowiły podstawę do podjęcia prób przemysłowych. Grube klasy ziarnowe wzbogacano w separatorze zawieszinowym Disa-1400, a klasy drobne w hydrocyklonie zawieszinowym $\phi 350 \text{ mm}$. Przeprowadzono w sumie 15 prób, w tym 7 prób wzbogacania grubych klas ziarnowych oraz 8 prób wzbogacania klas drobnych. Podobnie jak w badaniach laboratoryjnych, każdą próbę bilansowano, a następnie sporządzano schematy ilościowe. Poza tym, równoległe z próbami przemysłowymi prowadzono konkretne próby laboratoryjne. Stwierdzono, że wyniki prób przemysłowych w pełni pokrywają się z wynikami badań laboratoryjnych.

Prowadzono również próby flotacji rudy galmanowej. Otrzymano pozytywne wyniki flotacji koncentratu z I stopnia wzbogacania grubych i drobnych klas ziarnowych w cieczach ciężkich. Najpierw flotowano selektywnie siarczki, w kolejności: galena, blenda i markazyt, a następnie prowadzono flotację kolektywną utlenionych minerałów cynku i ołowiu. Wyniki flotacji innych produktów wzbogacania, jak również flotacji rudy surowej, były negatywne.

Zadawalające rezultaty prób laboratoryjnych i przemysłowych posłużyły do sporządzenia projektu technologicznego zakładu wzbogacania wstępnego rud galmanowych przed procesem ogniowym. Przeprowadzone badania wykazały, że wymieniony projekt można było sporządzić przy odpowiednim doświadczeniu, już na podstawie wyników prób laboratoryjnych.

4. Ocena technologiczna procesów wzbogacania

Ocenę technologiczną procesów przeróbki rud Zn-Pb prowadzi się na podstawie wskaźników wzbogacania, do których należą: uzysk i

zawartość metalu w koncentracji, absolutny współczynnik wzbogacania, wychód odpadów wzbogacania wstępnego, sprawność metalurgiczna i wskaźnik selekcji [19]. Oceniając proces flotacyjny bierze się także pod uwagę zużycie odczynników, czas flotacji itp.

Spośród wymienionych wskaźników pierwsze trzy mają podstawowe znaczenie. Decydują one bowiem w głównej mierze o wyniku oceny. Jednak zakres stosowania tych wskaźników jest ograniczony, gdyż jak wykazały badania [4], wskaźniki te są w dużym stopniu zależne od jakości rudy, tj. od zawartości metalu w tej rudzie i stopnia jego utlenienia. Pomijanie tych czynników, zwłaszcza gdy nadawcy do procesów przerobczych znacznie się różnią, prowadzi zwykle do fałszywych wniosków. Stąd też wymienione wskaźniki można stosować w przypadku wzbogacania tej samej rudy różnymi sposobami, co ma miejsce przy prowadzeniu prób laboratoryjnych.

W praktyce przedmiotem oceny są z reguły procesy przerobcze, w których nadawcy do wzbogacania są jakościowo różne. W takich okolicznościach oblicza się wskaźniki oceny procesów [4], [11], zwykle w odniesieniu do metali siarczkowych, ponieważ w warunkach krajowych utlenione minerały cynku, ołowiu i żelaza nie podlegają flotacji. Wymienione wskaźniki pozwalają na jednoznaczną ocenę procesów pod kątem widzenia uzysku i zawartości metalu w koncentracji, przy uwzględnieniu wpływu jakości rudy na wyniki wzbogacania.

Wskaźnik oceny procesu jest bardzo użyteczny w badaniach, nad odtwarzaniem przemysłowych procesów flotacji w skali laboratoryjnej. W warunkach przemysłowych, ruda kierowana do zakładu przerobczego ulega często dużym wahaniom, pod względem zawartości metali i stopnia ich utlenienia. Dlatego nadawca do flotacji (wsad) w przemysłowym bilansie metali tego procesu, miesięcznym lub kwartalnym, może znacznie odbiegać od nadawcy do flotacji w skali laboratoryjnej, co jak wiadomo przynosi wyniki wzbogacania, mimo stosowania identycznych warunków flotacji.

Wobec powyższego, wydanie opinii na podstawie porównania bilansów metali, czy przemysłowy proces flotacji został odtworzony w skali laboratoryjnej, może nastroczać dużych trudności. Trudności te eliminuje wskaźnik oceny procesu. Jeżeli wskaźniki oceny danego procesu prowadzonego w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych są w przybliżeniu jednakowe, wówczas można stwierdzić, że proces ten został odtworzony w skali laboratoryjnej.

Przedmiotem badań laboratoryjnych są różne rudy, niekiedy znacznie odbiegające pod względem zawartości metali od dotychczas wzbogaczanych; dotyczy to może np. flotacji rud bardzo ubogich, zalegających na

zwałach kopalnianych. W takich przypadkach wskaźnik oceny procesu umożliwia również wydanie opinii, czy dany proces przemysłowy został odtworzony w skali laboratoryjnej. Wskaźnik ten daje także duże usługi przy ocenie nowych rozwiązań technologicznych.

Jak już zaznaczono, wskaźnik oceny procesu uwzględnia wpływ zawartości metalu w rudzie na wyniki wzbogacania, dlatego wskaźnik ten w przeciwieństwie do uzysku i jakości koncentratu jest wielkością stałą dla danego procesu. Wyznaczenie wpływu jakości rudy na wyniki wzbogacania stanowi oddzielne zagadnienie. W celu pokreślenia ważności tego zagadnienia w pracach nad odtwarzaniem przemysłowych procesów przerobczych w skali laboratoryjnej, dalej przedstawiono niektóre wyniki badań statystycznych w tym zakresie.

Przeprowadzone na szeroką skalę badania statyczne w większości przemysłowych wskaźników wzbogacania procesów przeróbki rudy siarczkowej, jak również galmanowej w piecach przeważowych [1], [3-5], przy użyciu komputera "Odra", wykazały zależność uzysków metali od zawartości tych metali w nadawie i koncentracie: im niższa zawartość metalu w nadawie lub wyższa jego zawartość w koncentracie, tym niższy uzysk. Przy wzbogacaniu metodami flotacyjnymi i grawitacyjnymi dochodzi trzeci istotny czynnik, który decyduje o wartości uzysku cynku i ołowiu - jest nim stopień utlenienia tych metali: im jest on wyższy, tym niższe uzyski cynku i ołowiu. Warto dodać, że wpływ zawartości metalu w nadawie na uzysk ma miejsce również przy amoniakalnym ługowaniu rudy galmanowej 3.

Analiza wyników przeprowadzonych badań [4], [7] wykazała, że zależność uzysku metalu od jego zawartości w nadawie i koncentracie, przy wzbogacaniu rudy Zn-Pb, określa następująca funkcja korelacyjna:

$$\xi = \frac{a \cdot \beta}{\alpha} + b$$

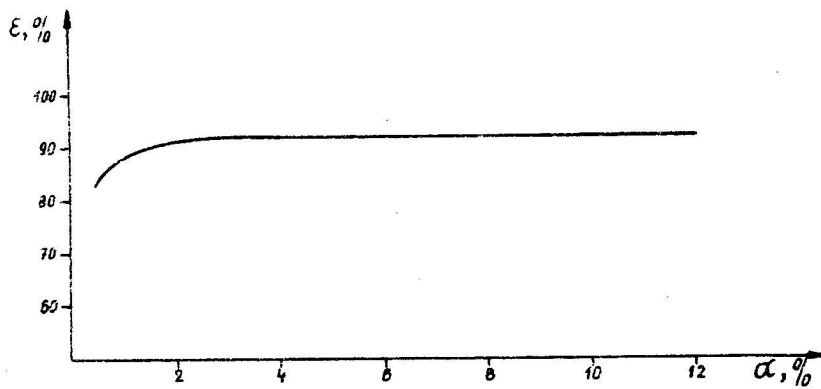
gdzie ξ - oznacza uzysk metalu w koncentracie w %,

α, β - zawartość metalu w nadawie w %,

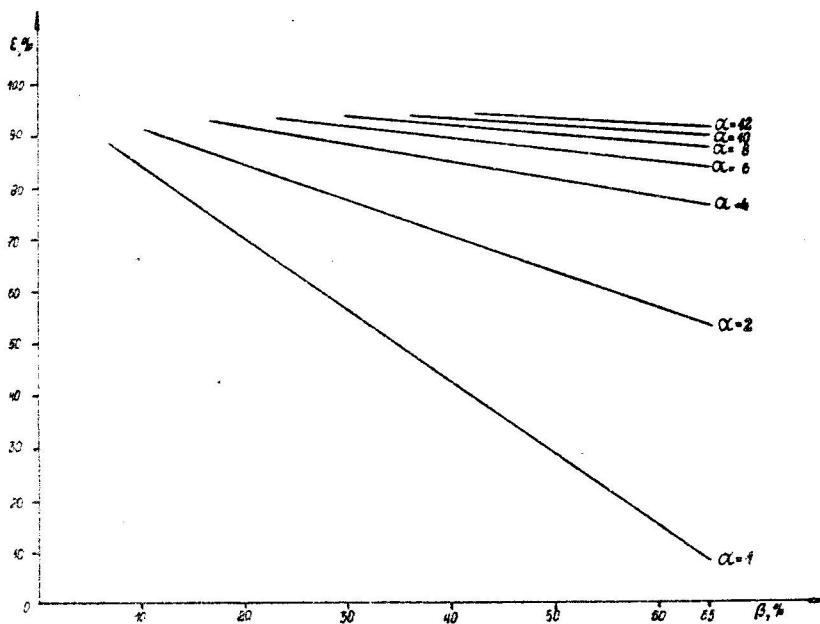
a, b - stałe, wyznaczone za pomocą badań statystycznych. Stałe te obliczone dla uzysku Zn/S w koncentracie blendowym z flotacji selektywnej w zakładach na Górnym Śląsku wynoszą:

a = 1,3772, b = 97,3051.

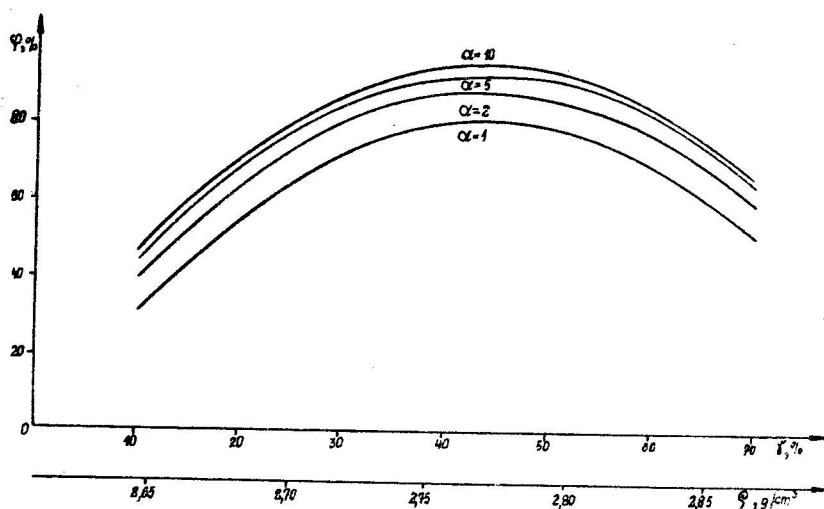
Wykres podanej funkcji przy wartościach stałych a, b przedstawiono na rys. 9. Na rys. 8 pokazano zaś wykres uzysków Zn/S w surowym koncentracie blendowym, przy różnej zawartości tego metalu w nadawie do flotacji.



Rys. 8. Zależność uzysku Zn/S w surowym koncentracie blendowym od zawartości tego metalu w nadawie do flotacji



Rys. 9. Zależność uzysku Zn/S w blendzie flotacyjnej od zawartości tego metalu w wymienionym koncentracie i w nadawie do flotacji



Rys. 10. Zależność stopnia zubożenia w Zn/S odpadów ze wzbogacania grubych klas ziarnowych rudy w zawieszinowej cieczy ciężkiej od gęstości tej cieczy (a tym samym od wychodu odpadów) i od zawartości Zn/S w rudzie surowej

Analizując wykresy na rys. 8 i 9 dochodzi się do wniosku, że wytwarzanie koncentratu blendowego o wysokiej jakości okupione jest dużym spadkiem uzysku Zn/S, szczególnie wtedy, gdy zawartość tego metalu w nadawie do flotacji jest mała. Jest to zrozumiałe, ponieważ im uboższa ruda, tym gorszej jakości koncentrat otrzymuje się z flotacji surowej, co stwierdzono doświadczalnie [8], i tym większą ilość operacji oczyszczających należy zastosować, aby otrzymać koncentrat o wymaganej zawartości metalu. Stosowanie zaś coraz to większej ilości operacji flotacyjnego oczyszczania koncentratu powoduje sukcesywny wzrost strat metalu w odpadach. Objaw ten jest wynikiem zjawisk fizykochemicznych zachodzących w procesie flotacji [8].

Przy ocenie wyników wzbogacania siarczkowej rudy Zn-Pb w cieczach ciężkich w skali laboratoryjnej i przemysłowej, duże usługi oddają wykresy na rys. 10. Wykresy te wykazują spadek stopnia zubożenia w Zn/S odpadów wzbogacania wstępnego przy przerobie coraz to uboższej rudy, co powoduje wzrost strat tego metalu. Szczegółowe omówienie powyższego zadagnienia w ujęciu matematycznym (funkcje korelacyjne) podano w pracach [5] i [7].

Dotychczasowe badania wykazały, że funkcje korelacyjne wskaźników wzbogacania są bardzo pomocne nie tylko przy ocenie procesów przeróbczych i odtwarzaniu tych procesów w skali laboratoryjnej,

ale funkcje te umożliwiają prognozowanie wyników wzbogacania, jak również projektowanie optymalnych technologii.

5. Podsumowanie

W pracy otrzymano bardzo dużą zgodność wyników wzbogacania w skali laboratoryjnej i przemysłowej. Poza tym, wnioski z badań fizykochemicznych prowadzonych przy użyciu izotopów [9-11], sprawdziły się po przeprowadzeniu flotacji rudy w skali laboratoryjnej. Na podstawie wyników prób cyklicznych można mieć pewność, że wnioski te sprawdzają się także w warunkach przemysłowych.

W pracy podkreślono, że stosowanie właściwych metod badawczych ma duże znaczenie dla szybkiego wdrażania wyników badań w przemyśle. Próby cykliczne flotacji umożliwiają należyte wyznaczenie parametrów technologicznych tego procesu już na etapie badań laboratoryjnych. Parametry te stanowią zaś podstawę do przeprowadzenia oceny technologicznej i ekonomicznej danego rozwiązania, koniecznej do podjęcia decyzji o zastosowaniu tego rozwiązania w skali przemysłowej.

LITERATURA

- 1 Dąbrowski K., Koperwas J., Próby przemysłowe wzbogacania rudy w osadzarce zawieszinowej Disa. Sprawozdanie ZBiD KGH "Orzeł Biały" nr 1, 1969, BW.
- 2 Dąbrowski K., Blitek Z., Czarkowski H., Koperwas J., Wzbogacanie wstępne rud Zn-Pb w osadzarce zawieszinowej Disa-1400. Rudy i Metale R. 15, 1970, nr 11, s. 585-592.
- 3 Dąbrowski K., Opracowanie technologii mechanicznego wzbogacania galmanu. Sprawozdanie ZBiD KGH "Orzeł Biały" nr 2, 1972, BW.
- 4 Dąbrowski K., Badania statystyczne wskaźników wzbogacania. Sprawozdanie ZBiD KGH "Orzeł Biały" nr 1, 1973, BW.
- 5 Dąbrowski K., Wzbogacanie rudy pozabilansowej ze związków. Sprawozdanie ZBiD KGH "Orzeł Biały" nr 1, 1974, WM.
- 6 Dąbrowski K., Zdybiewska K., Problemy wzbogacalności rud galmanowych i niektóre zagadnienia przeróbki tych rud metodami metalurgii chemicznej. III Sympozjum Ogólnopolskie, Pr. Nauk. Inst. Chem. Nieorg. i Met. Pier. Rzadkich PWr Wrocław, Nr 29. Hydro-metalurgia miedzi i innych metali, 1975.

- 7 Dąbrowski K., Pudło W., Badania nad wzbogacaniem ubogich rud cynkowo-ołowiowych. Referat na IV Krajowym Zjeździe Górnictwa Rud. SI i TGRC, Bytom 1975 (w druku).
- 8 Dąbrowski K., Opracowanie technologii flotacji rudy zailonej. Sprawozdanie ZBiD KGH "Orzeł Biały" nr 1, 1975, WM.
- 9 Girczys J., Badania procesu flotacji przy pomocy izotopów. Cz. II. Badania adsorpcji miedzi na sfalerycie z niecki bytomskiej. Sprawozdanie ZBiD KGH "Orzeł Biały", Brzeziny Śl., 1969.
- 10 Girczys J., Trasowanie potoków materiałowych w maszynach flotacyjnych i badanie mechanizmu oddziaływania odczynników w procesie flotacji rud Zn-Pb, cz. III. Oddziaływanie aktywatora i zbieracza ze sfalerytem. Sprawozdanie ZBiPM "Cuprum", Bytom 1973.
- 11 Girczys J., Dąbrowski K., Zależność zużycia siarczanu miedzi od pH we flotacji blendy cynkowej. Rudy i Metale. R. 19, 1975, nr 6 (w druku).
- 12 Hukki R.T., Hot flotation improves selectivity and raises mineral recoveries. World Mining, 1973, t. 26, nr 3, s. 74-76.
- 13 Mijagkowa T.M., O podszycie technologicznych rezultatów obogaszczania przy prowadzeniu laboratoryjnych prób po principie nieprzerwanego procesu. Trudy Instytutu "Mechanobr", nr 131, s. 260-272, Leningrad 1962.
- 14 Molicka-Haniawetz A., Ogaza H., Możliwości zastosowania flotacji kolektywnej rud cynkowo-ołowiowych. Rudy i Metale R. 6, 1961, nr 8, s. 352-355.
- 15 Laskowski J., Fizykochemiczne podstawy i niektóre zagadnienia technologii procesu flotacji kopalin. Skr. uczel. Polit. Śl. im. W. Pstrowskiego, nr 104, Gliwice 1964.
- 16 Laskowski J., Fizykochemiczne metody wzbogacania w przeróbce kopalin. Fizykochemiczne problemy przeróbki kopalin. Z. nr 8, s. 13-30, Wrocław 1974.
- 17 Płaczek J., Molicka-Haniawetz A., Kolektywno-selektywna flotacja blendy i markazytu. Rudy i Metale. R. 14, 1969, nr 9, s. 524-528.
- 18 Stachurski J., Przyczynek do wyznaczania błędu funkcji uzysku. Rudy i Metale, R. 6, 1961, nr. 6, s. 256-266.
- 19 Stępniański W., Wzbogacanie grawitacyjne, PWN Łódź-Warszawa-Kraków 1964.
- 20 Yonezawa T., Experimental Study of Adsorption and Desorption of Xanthate by Sphalerite. Bull. Inst. Min. Metall. - Transactions of IMM 70, 1961, nr 6, s. 359-363.