

HENRYK CZARKOWSKI

ZGH "Orzeł Biały" Bytom

ZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA PRĘDKOŚCI FLOTACJI

Streszczenie. W artykule omówiono kinetykę procesu flotacji. Na podstawie licznych doświadczeń określono zachowanie się współczynnika prędkości flotacji dla różnych minerałów. Wykazano, że współczynnik prędkości flotacji jest precyzyjniejszym narzędziem badania przebiegu flotacji niż uzysk.

Znajomość przebiegu procesu w czasie ma duże znaczenie praktyczne ze względu na umiejętność kierowania nim oraz na objętość aparatury potrzebnej dla przeprowadzenia go. Dlatego też również kinetyka procesu flotacji przyciągała uwagę badaczy, z których pierwszy Huber-Panu określił w 1931 r. prędkość flotacji jako tangens kąta nachylenia krzywej uzysku w układzie współrzędnych uzysk - czas, a pierwszy Zuniga podał w 1934 r. matematyczną formułę określającą kinetykę flotacji [1]

$$\log \frac{1}{1-\varepsilon} = K_z t \quad (1)$$

gdzie:

 ε - uzysk w częściach jednościi, t - czas flotacji, min., K_z - stała Zunigi, tym większa (bliższa jednościi) im intensywniej przebiega proces flotacji w czasie.

Równanie Zunigi można przekształcić w formułę określającą bezpośrednio wielkość uzysku w zależności od czasu w postaci funkcji wykładniczej.

$$\varepsilon = 1 - e^{-Kt} \quad (2)$$

Ponieważ funkcja (2) ma postać krzywej z samej istoty, a funkcja (1) postać prostej, niektórzy autorzy zwłaszcza Biełogłazow zalecają używanie pierwszej formuły. W praktyce jednak współczynnik prędkości flotacji, podany przez Zunigę jako wartość stała (K_z), okazał się w większości przypadków zmienny w czasie, dlatego stosowanie formuły (1) jest sprawą czysto umowną.

Kinetyką flotacji zajmował się szczegółowo Biełogłazow, którego stanowisko można w krótkości sformułować następująco: [1] - proces flotacji składa się z masowo występującego zjawiska zderzeń ziarn mineralnych z pęcherzykami powietrza. Zjawisko to charakteryzuje się pewnym stopniem prawdopodobieństwa utrwalenia agregatu: pęcherzyk - ziarno i z tych względów można stosować do niego zasady statystyczne. Biełogłazow ustala wzór na ilość ziarn dx , które przeszły do koncentratu w czasie dt :

$$dx = K N \varphi (n_0 - x) dt \quad (3)$$

gdzie:

N - ilość pęcherzyków powietrza, które przepłynęło przez męty w czasie dt ,

n_0 - początkowa ilość ziarn w mętach,

x - ilość ziarn odflotowana w czasie t ,

φ - prawdopodobieństwo trwałości agregatu pęcherzyk-ziarno,

K - stała danego układu flotacyjnego.

Ze wzoru wynika, że ilość ziarn przechodząca momentalnie do koncentratu jest proporcjonalna do chwilowej zawartości składnika flotowanego w mętach: $n_0 - x$.

Przekształcając i całkując wyrażenie [3] Biełogłazow otrzymał:

$$\int_0^x \frac{dx}{n_0 - x} = \ln \frac{n_0}{n_0 - x} = K \int_0^t N \varphi dt$$

wprowadzając oznaczenie uzysku w częściach jednostki $\varepsilon = \frac{x}{n_0}$

Biełogłazow otrzymał ostatecznie

$$\ln \frac{1}{1 - \varepsilon} = K \int_0^t N \varphi dt \quad (4)$$

Jest to formuła wielokrotnie powtarzana w różnych modyfikacjach przez szereg autorów zwłaszcza radzieckich. Przydatność jej jest problematyczna z uwagi na niemierzalną wielkość N , jak również nie wiele łatwiej dające się określić prawdopodobieństwo udanych zderzeń φ . Tym niemniej wyraża ona podstawową zależność uzysku od tych czynników.

Badania innych i późniejszych autorów usiłowały wyjaśnić charakter tej zależności. Płaksin, Klassen i Berger podają równanie kinetyki flotacji w postaci [2]

$$\frac{dx}{dt} = z \varphi [N] \cdot [x_0 - x]^n \quad (5)$$

gdzie:

- z - odpowiada współczynnikowi K u Biełogłazowa,
- x_0 - odpowiada n_0 u Biełogłazowa,
- n - wykładnik potęgi.

Autorzy wyraźnie stawiają zagadnienie kinetyki flotacji na bazie prawa działania mas, a wartość wykładnika potęgi ma charakteryzować ten proces. Większość autorów, w tym Zuniga, Biełogłazow, Gründer i Kadur, Sutherland uważają, że $n = 1$, Arbitier, Mitrofanow przyjmują $n = 2$, a Bogdanow i tow., znaleźli, że n waha się w granicach 1 do 6 [3].

Gaudin wprowadza pojęcie właściwej prędkości flotacji we wzorze na zależność uzysku od czasu [4].

$$\ln \frac{c}{c_0} = -at \quad (6)$$

gdzie:

- c - koncentracja danego składnika w mętach, g/l wody,
- c_0 - początkowa koncentracja tego składnika,
- Q - właściwa prędkość flotacji, min.⁻¹.

Biorąc pod uwagę, że

$$\frac{Q_a - c}{c_0} = \varepsilon$$

łatwo można sprowadzić formułę podaną przez Gaudina do wzoru Zunigi, a tym samym do identyczności właściwej prędkości flotacji Q ze stałą Zunigi K_z .

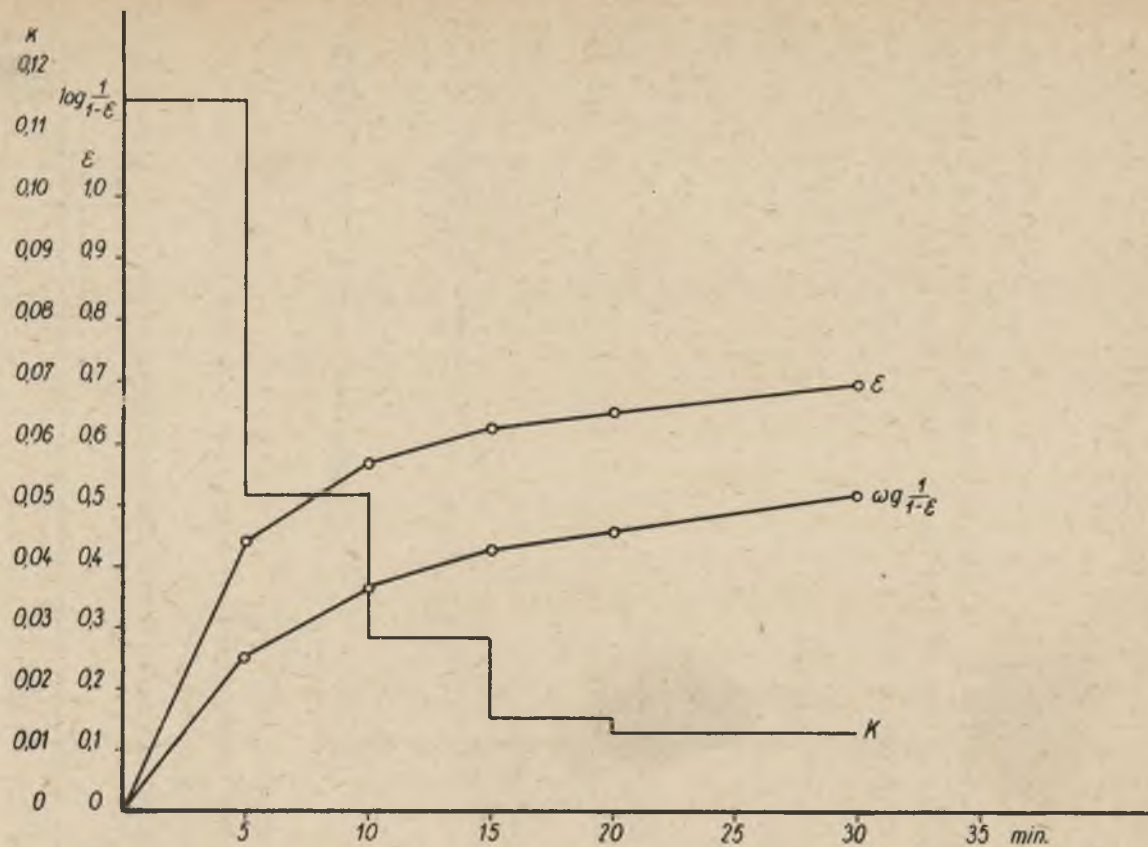
Uogólniając przegląd literatury dotyczącej kinetyki flotacji można stanowisko większości omawianych autorów określić formułą:

$$\log \frac{1}{1-\varepsilon} = f(t) \quad (7)$$

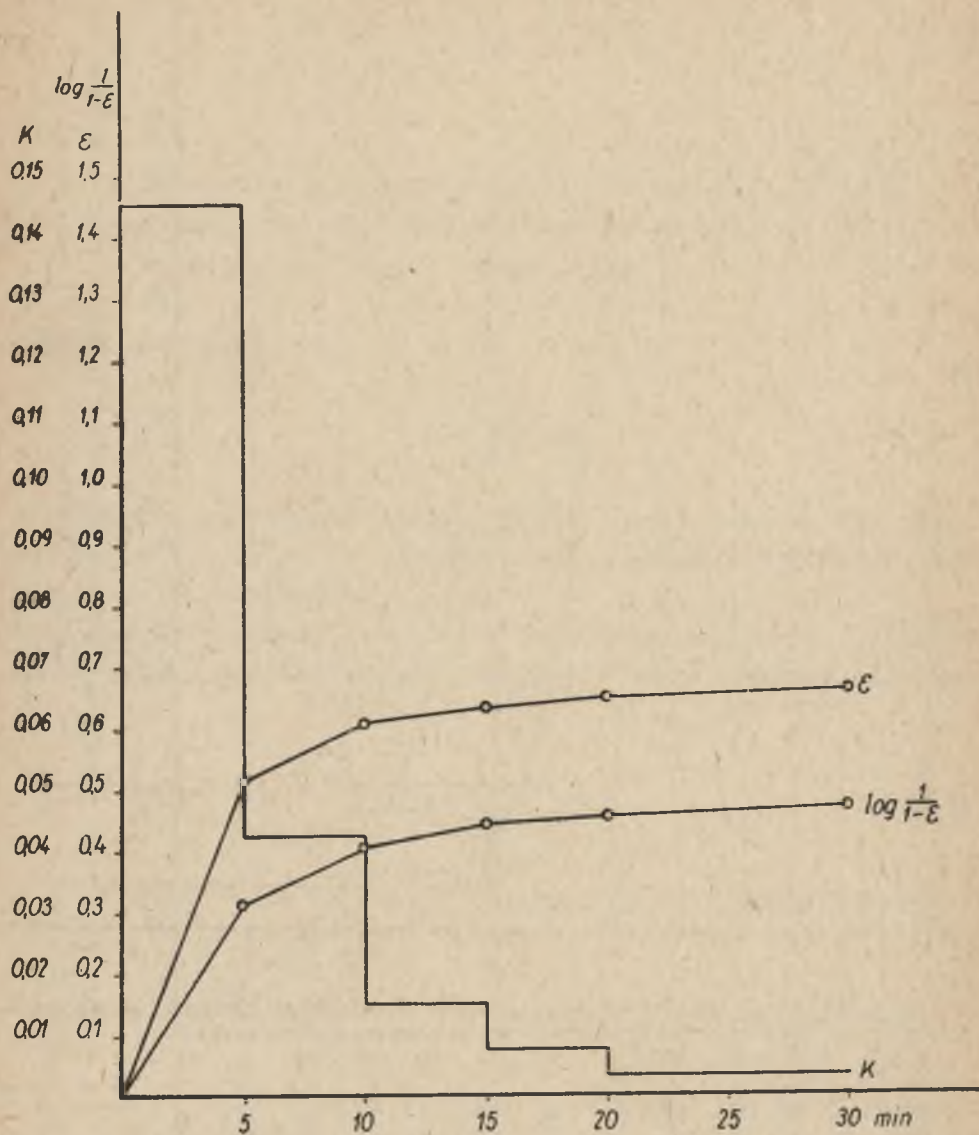
Nie zagłębiając się dalej w szczegóły dziś już obszernej literatury na temat kinetyki flotacji nastroczają się konkretne pytania:

- jakie wartości przybiera współczynnik prędkości flotacji oraz,
- w jakiej mierze ten współczynnik może mieć wartość użytkową dla analizy procesu flotacji.

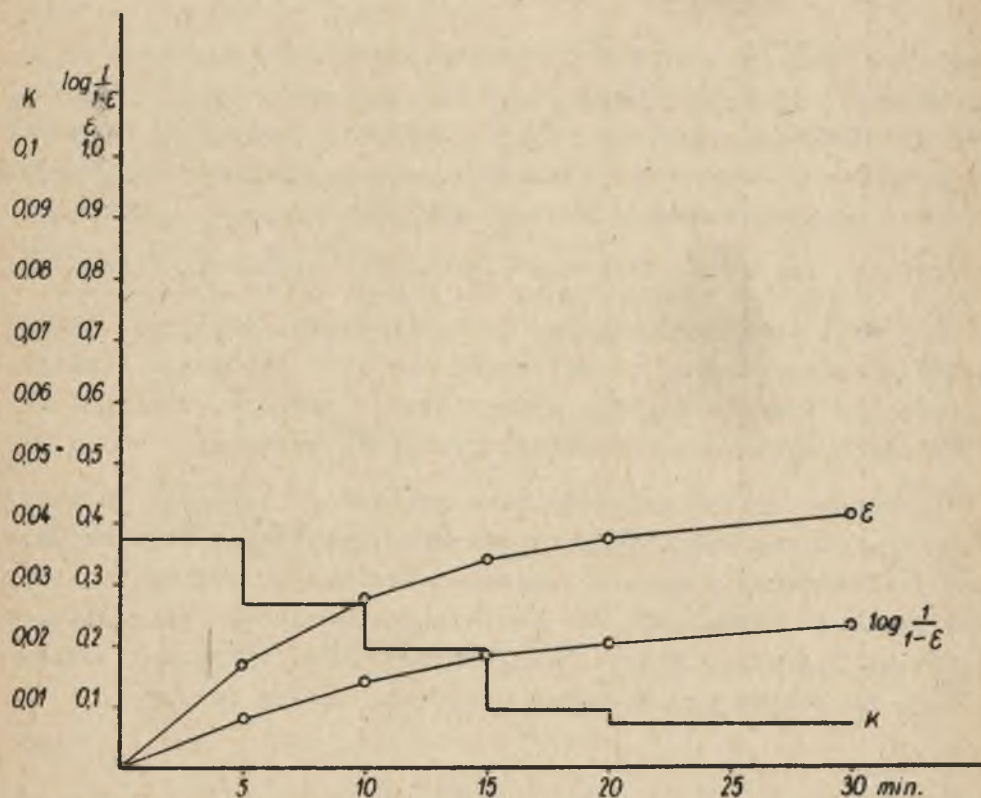
Dla uzyskania materiału do odpowiedzi na postawione pytania wyliczono wartości współczynnika prędkości flotacji na podstawie wyników eksperymentalnych szeregu flotacji frakcjonowanych, dostarczonych uprzejmie przez dr inż. A. Molicką-Haniawetz z



Rys. 1. Uzysk i współczynnik prędkości flotacji Pb w zależności od czasu



Rys. 2. Uzysk i współczynnik prędkości flotacji Zn w zależności od czasu



Rys. 3. Uzysk i współczynnik prędkości flotacji ϵ w zależności od czasu

Instytutu Metali Nieżelaznych. Obliczenia współczynnika dokonano na podstawie stosunku przyrostów wartości wyprowadzonych z równania (7):

$$\frac{2,3 \Delta (\log \frac{1}{1-\varepsilon})}{\Delta t} = K \quad (8)$$

Wartości $\log \frac{1}{1-\varepsilon}$ przy znanych wartościach ε wzięto z tablicy zawartej we wspomnianej pracy Biełogłazowa. Wykorzystany materiał stanowił wyniki 12 flotacji frakcjonowanych Pb, Zn, Fe i Cu. Rysunki 1 do 3 przedstawiają przebieg flotacji minerałów ołowiu, cynku i żelaza w czasie, wyrażony krzywymi uzysku ε , wartością $\log \frac{1}{1-\varepsilon}$, oraz współczynnikiem prędkości flotacji K.

Porównując wykresy uzysku ε i wyrażenia $\log \frac{1}{1-\varepsilon}$ można dojść do przekonania, że zmienność ich jest podobna a zlogarytmowanie nie spowodowało wyprostowania wykresu, dlatego też w dalszych rysunkach zaniechano rysowania wyrażenia $\log \frac{1}{1-\varepsilon}$.

Schodkowy wykres współczynnika prędkości flotacji na rys. 1+3 daje od razu odpowiedź na pierwsze pytanie, współczynnik ten jest zmienny w czasie i przedstawia krzywą podobną do krzywej rozkładu normalnego, co jest zgodne z masowym charakterem zjawiska flotacji. Krzywej tej, jeśli przejść z wykresu schodkowego na krzywą płynną, można przypisać ogólną formułę

$$K = a e^{ct^2} \quad (9)$$

gdzie:

- K - współczynnik prędkości flotacji,
- a, c - parametry, przy czym $a > 0$, $c < 0$,
- t - czas flotacji, min.,
- e - podstawa logarytmów naturalnych.

Krzywą tego typu nie ma żadnych skłonności do zachowania stałej wartości. Zanikający charakter współczynnika K jest w

pełni zrozumiały jeśli wziąć pod uwagę, że składnik użyteczny reprezentowany przez określony typ mineralny przedstawia zbiór osobników mineralnych o zróżnicowanej aktywności flotacyjnej, która zależy od wielkości i kształtu ziarn, stopnia pokrycia powierzchni odczynnikami hydrofobizującym, stopnia przerastania i od wielu innych czynników, których wpływ jest obiektem badań wielu eksperymentatorów.

Jest sprawą oczywistą, że osobniki mineralne o większej aktywności flotują się w początkowym okresie flotacji rezultując wysokimi wartościami współczynnika K. W miarę odflotowania tych osobników następuje flotacja osobników o mniejszej aktywności flotacyjnej, co przejawia się odpowiednim spadkiem wartości współczynnika prędkości flotacji.

W związku z takim kształtem współczynnika prędkości flotacji postać różniczkowa flotacji wyrazi się wzorem:

$$\frac{dx}{n_0 - x} = K dt = a e^{ct^2} dt \quad (10)$$

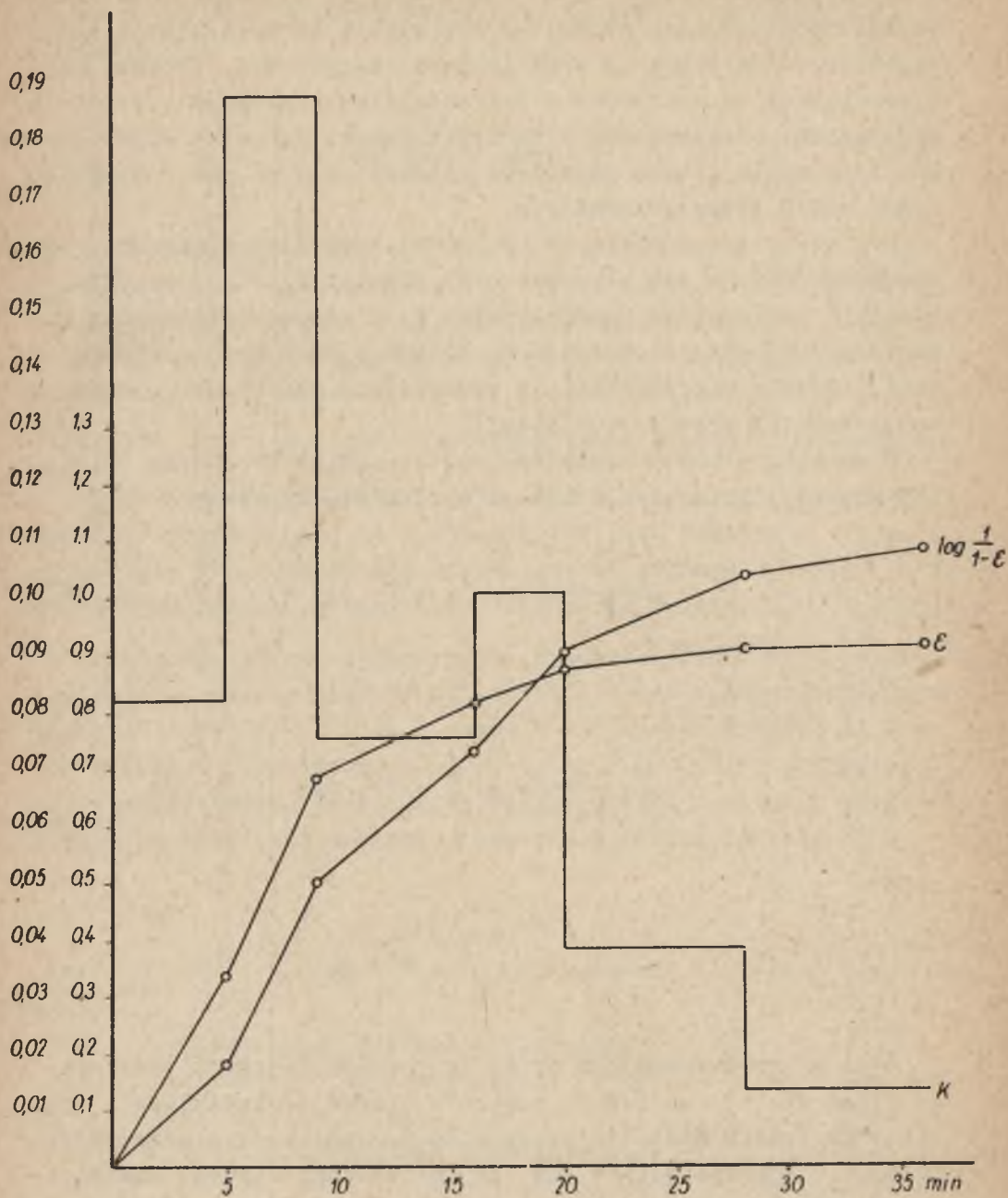
a po scałkowaniu

$$\int_0^x \frac{dx}{n_0 - x} = a \int_0^t e^{ct^2} dt$$

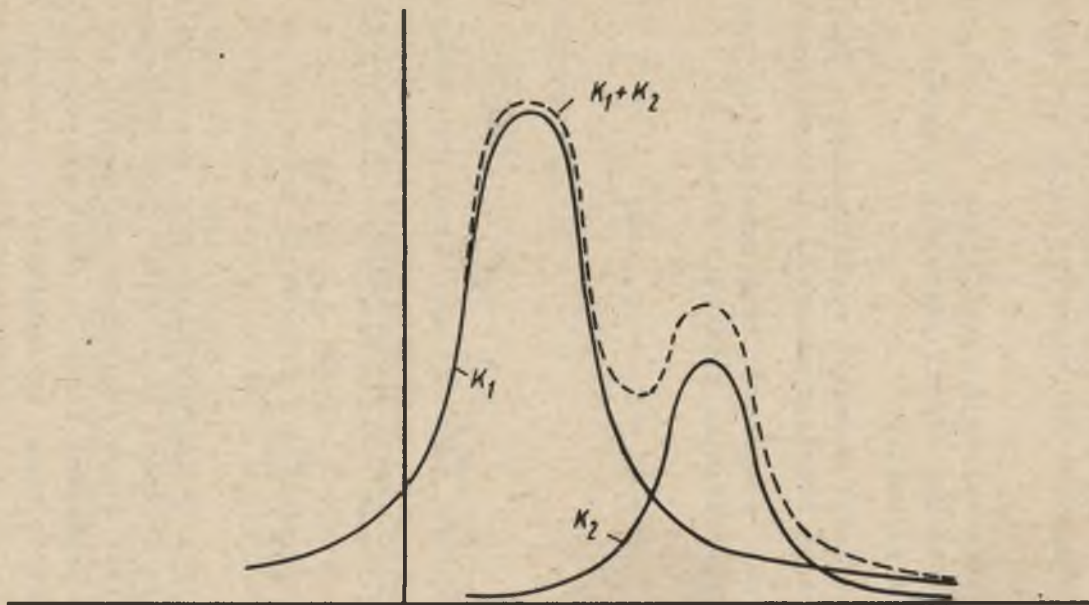
stąd

$$\ln \frac{1}{1 - \frac{x}{n_0}} = a \int_0^t e^{ct^2} dt \quad (11)$$

Rys. 4 przedstawiający przebieg procesu flotacji rudy miedzi daje dla K wartości zupełnie inaczej zmieniające się niż w przypadku flotacji poprzednio wymienionych siarczków Zn, Pb i Fe. Jednakże wydaje się, że ta odmienność jest nieistotna, a wynika raczej ze skumulowania zróżnicowanych współczynników prędkości flotacji trzech różnych minerałów stanowiących koncentrat miedzi a mianowicie chalkozynu, bornitu i ilu.



Rys. 4. Uzysk i współczynnik prędkości flotacji Cu w zależności od czasu



Rys. 5. Schemat nakładania się krzywych o przesuniętych fazach

Niechaj krzywa K_1 (rys. 5) odpowiada współczynnikowi prędkości flotacji jednego minerału miedzionośnego, K_2 - drugiego, to krzywa sumaryczna $K_1 + K_2$ będzie odpowiednikiem linii łamanej współczynnika K z rys. 4. Natomiast przesunięcie faz tych krzywych w stosunku do osi pionowej mogło być spowodowane przez:

- flotację ilów, które wpływają opóźniająco na flotację obu minerałów miedzionośnych dopóki pozostają w mętach przynajmniej w głównej swej masie,
- flotację aktywniejszego minerału miedzionośnego, który z kolei opóźnia flotację drugiego minerału miedzionośnego.

Matematyczny wyraz powyższej tezy przedstawia uogólniony wzór na wielkość współczynnika prędkości flotacji:

$$K = K_1 + K_2 + \dots + K_n$$

gdzie:

$$K_n = a_n e^{b_n t + c_n t^2}$$

i odpowiednio wielkość uzysku można wyrazić sumą całek:

$$\ln \frac{1}{1-\xi} = \sum_1^n a_n \int_0^t e^{b_n t + c_n t^2} dt \quad (13)$$

W miarę im prostszy model mineralogiczny przedstawia wzbogacana kopalina i im bardziej jednorodny jest flotowany jej składnik, tym prostsze staje się wyrażenie określające wielkość współczynnika prędkości flotacji przez przyrównanie do zera kolejnych parametrów przy wykładnikach potęgowych wyrażenia:

$$K = a e^{bt + ct^2}$$

W przypadku $b = 0$

$K = ae^{at^2}$ - jest to wielkość znaleziona w przypadku flotacji siarczków Pb, Zn i Fe.

W przypadku $c = 0$

$$K = ae^{bt}$$

$$\ln \frac{1}{1-\varepsilon} = a \int_0^t e^{bt} dt = \frac{a}{b} (e^{bt} - 1)$$

W przypadku $b = 0$ i $c = 0$

$$K = a = \text{const.}$$

$$\ln \frac{1}{1-\varepsilon} = a \int_0^t dt = at$$

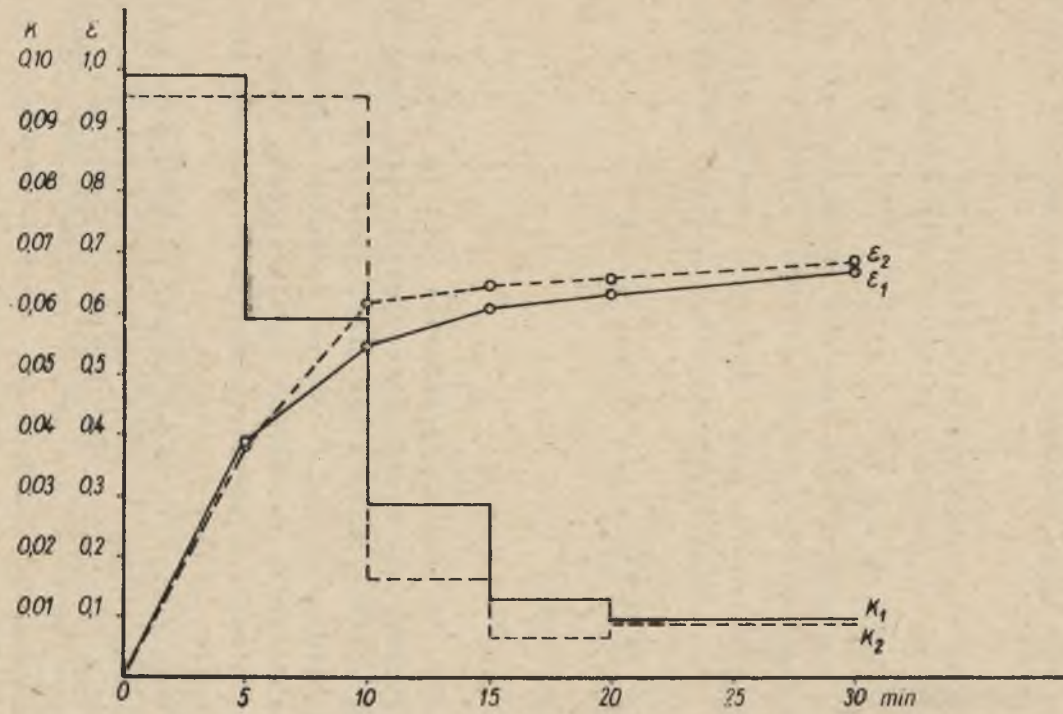
Jest to równanie Zunigi

$$\text{wtedy } \varepsilon = 1 - e^{-at}$$

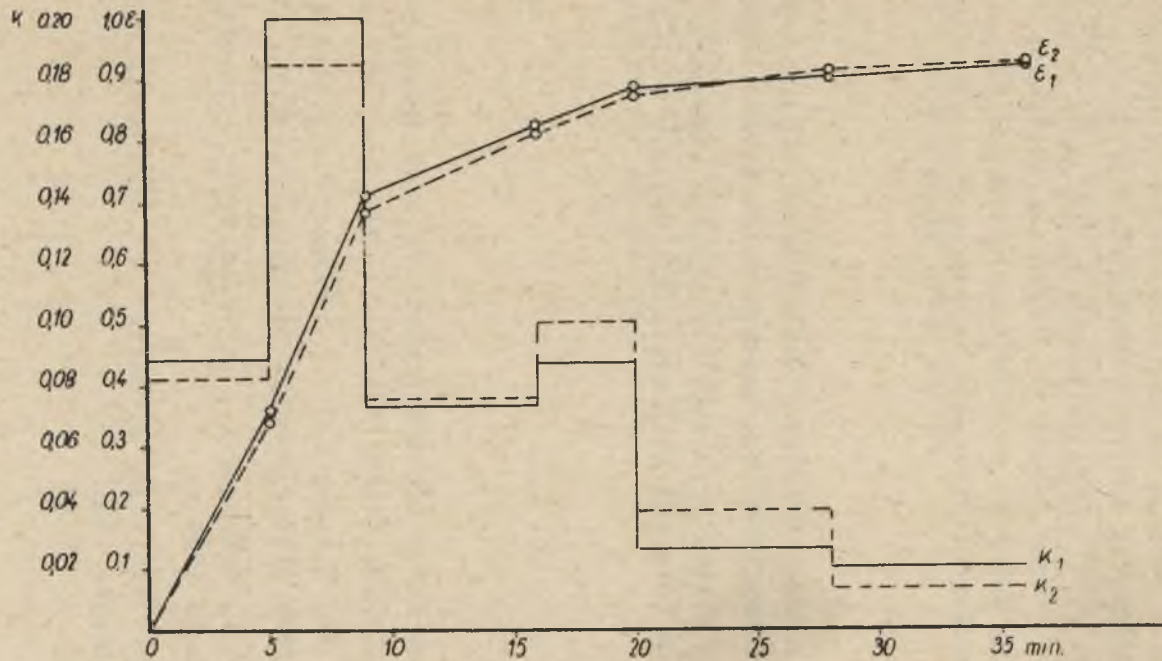
Jest oczywiste, że przebadany materiał jest za szczupły jako dowód statystyczny, ale wystarczająco powtarzalny, aby oprzeć na nim hipotezę roboczą określającą prawdopodobny wzór zmienności współczynnika prędkości flotacji. Zadaniem hipotezy roboczej jest statystyczne określenie prawidłowości, którym podlega kinetyka flotacji, a potwierdzenie sprawdzalności może dać narzędzie do analizy procesu flotacji.

O wartości tego narzędzia można sądzić na podstawie przytoczonych już wykresów (rys. 1 do 4) jak i na podstawie dalszych, które zostaną tutaj omówione. Z wykresów poprzednich wynikają dwa spostrzeżenia:

- 1 - różne minerały cechują się odmienną prędkością flotacji, którą w przypadku omawianych rud można uporządkować malejąco: Cu, Zn, Pb, Fe;
- 2 - decydujące znaczenie dla wielkości uzysku ma prędkość flotacji w początkowym jej okresie, który dla minerałów Zn i Pb wynosi około 10 min. a dla minerałów miedzi około 20 min.



Rys. 6. Uzysk i współczynnik prędkości flotacji Zn
 1 - Na X 150 g/t, 2 - Na X 200 g/t



Rys. 7. Uzysk i współczynnik prędkości flotacji Cu
1 - ruda wapienna, 2 - ruda łupkowa

Wykresy na rys. 6 podają wyniki wzbogacania rudy Zn przy za stosowaniu reżimu odczynników różniącego się dozą 50 g/t. Różnice wyników wzbogacania w obu przypadkach zaznaczają się w krzywych uzysku jak i współczynnikach prędkości flotacji, ale w tych ostatnich bardziej wyraziście. Podobnie ma się sprawa w przypadku wzbogacania dwu różnych rud miedzi podanego wykresami 6 i K na rys. 7. Krzywe uzysku wykazują minimalne różnice podczas gdy krzywe łamane współczynnika prędkości te różnice podkreślają. Tak więc współczynnik prędkości flotacji wykazuje zalety ozułego instrumentu badawczego procesu flotacji.

Wnioski

1. Współczynnik prędkości flotacji jest precyzyjniejszym narzędziem badania przebiegu procesu flotacji niż uzysk.
2. Raptowny spadek prędkości flotacji po pierwszym jej okresie wskazuje na potrzebę intensyfikacji procesu w drugim okresie.

LITERATURA

- [1] Biełogłazov K.F.: Zakonomiernosti fłotacijonnogo processa. Miedziłłurgizdat. Moskwa 1947 r.
- [2] Płaksin J.N., Klassen W.J., Berger G.: O kinetičeskie u ravnienijach fłotacijonnogo processa. Cv. Miet. 1956.
- [3] Klassen V.J., Mokrousov V.A.: Vviedienije v teoriju fłotacii. Moskwa 1959 r.
- [4] Gaudin A.M.: Flotacja. Tłumacz. Olszewski, Piaseczny. Śląsk, Katowice 1963.

ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СКОРОСТИ ФЛОТАЦИИ

Резюме

В статье обсуждено кинетику процесса флотации.

На основании численных опытов определено величину коэффициента скорости флотации для разных минералов. Доказано, что коэффициент скорости флотации есть более точным инструментом исследования хода флотации чем извлечение.

IMPORTANCE OF FLOTATION SPEED FACTOR

Summary

In the article the dynamics of flotation process has been discussed. On the base of numerous tests behaviour of flotation speed factor for differents materials has been defined. It is shown, that flotation speed factor is more precise test instrument of flotation course than output.