

Dariusz Foszcz, Tomasz Niedoba*, Tadeusz Tumidajski**

ANALIZA MOŻLIWOŚCI PROGNOZOWANIA WYNIKÓW WZBOGACANIA POLSKICH RUD MIEDZI UWZGLĘDNIAJĄCEGO STOSOWANĄ TECHNOLOGIĘ

1. Uwagi wstępne

Technologie wzbogacania polskich rud miedzi są uzależnione od ich składu litologicznego a także od wymogów stawianych koncentratom. Przyjmuje się generalnie, że występuje pięć różnych układów technologicznych w oddziałach Zakładu Wzbogacania Rud (dwa w Rudnej, dwa w Lubinie i jeden w Polkowicach). Podwojenie układów technologicznych w Rudnej i Lubinie wynika ze wstępnego rozdziału rudy na frakcje z przewagą piaskowca lub węglanów. Ruda miedzi z zagłębia legnicko-głogowskiego wprowadzana do układów przygotowania do wzbogacania składa się praktycznie z trzech typów litologicznych (lito-frakcji): węglanów, piaskowców i łupków. Jest rzeczą oczywistą, że ze względu na różnice w budowie mineralogicznej skał, różnice w okruszczeniu i wielkościach wprysnięć minerałów miedzi podatności na wzbogacanie poszczególnych frakcji litologicznych są różne. Inaczej też przebiegają procesy przygotowania nadawy do wzbogacania (czyli procesy rozdrabniania i klasyfikacji), które są także zależne od udziałów poszczególnych frakcji litologicznych w nadawie. Konsekwencją tych uwarunkowań są pojawiające się przeciążenia różnych węzłów całego procesu technologicznego oraz zmienne wyniki wzbogacania.

W wielu zadaniach praktycznych występujących przy zarządzaniu gospodarką kombinatu górniczno-hutniczego polskich rud miedzi pojawia się potrzeba prognozowania rezultatów wzbogacania w sensie prognozy uzysków oraz zawartości miedzi w koncentratkach. Z punktu widzenia uwag przedstawionych powyżej, problem prognozowania wyników wzbogacania uwzględniającego realia technologiczne jest problemem złożonym. Próby jego rozwiązania zostaną przedstawione w prezentowanym artykule.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczno-Hutnicza, Kraków

2. **Możliwe podejścia do prognozowania efektów wzbogacania oraz ich uwarunkowania**

W przeróbce surowców mineralnych stosuje się powszechnie krzywe (funkcje) wzbogalności jako metodę oceny podatności surowca na wzbogacanie. Wielość możliwych do uzyskania krzywych (krzywe Henry'ego, Mayera, Halbicha, Halla, czy Fuerstenaua) tworzy podstawy do wszechstronnej interpretacji wyników oraz porównań metod wzbogacania i materiałów (surowców). Pewnym mankamentem tej metodyki jest zależność wyników ocen wzbogalności od sposobu przygotowania materiału do przeprowadzanych analiz (stopień rozdrabniania określający stopień uwolnienia ziaren minerałów użytecznych). Krzywe wzbogalności dają pogląd dotyczący potencjalnych wyników wzbogacania, w tym ocenę podatności na wzbogacanie. Na ich podstawie nie da się jednak przeprowadzić określenia wyników wzbogacania w konkretnym zakładzie przeróbczym, który realizuje określoną technologię wzbogacania.

Zadanie prognozowania wyników wzbogacania rud miedzi uwzględniające realia rzeczywistej technologii można próbować rozwiązać dwiema metodami, których zasady przedstawiamy.

Jako metodę pierwszą przyjmujemy metodę opartą na krzywych wzbogalności. Jej algorytm przedstawia się następująco:

- przyjąć jednolitą procedurę przygotowania nadawy do frakcjonowanych flotacji laboratoryjnych dla poszczególnych typów litologicznych pochodzących z danego rejonu eksploatacyjnego;
- wykonać frakcjonowane flotacje dla poszczególnych typów litologicznych;
- metodami rachunkowymi wyznaczyć średnią, ważoną udziałami typów we wzbogacanej rudzie, krzywą wzbogalności dla mieszaniny typów litologicznych;
- porównując wyniki uzyskane dla krzywej wzbogalności (wg zasad punktu poprzedniego) z krzywą uzyskaną z rozflotowania koncentratu i odpadów otrzymanych z danej rudy (mieszanki typów) uzyskać wzory pozwalające na przeliczanie jednych krzywych na drugie (można powiedzieć — krzywych wzbogalności na krzywe wzbogacania).

Opisany algorytm wymaga jednak przyjęcia wielu mocnych założeń, z których najważniejsze to:

- niezmiennosc (lub niewielka zmienność) charakterystyk mineralogiczno-petrograficznych typów litologicznych rejonu;
- niezależność rozdrabniania poszczególnych typów od obecności innych typów litologicznych w mieszaninie;
- niezależność przebiegu flotacji (analogicznie jak dla rozdrabniania);
- dostatecznie dokładne wyznaczenie udziałów typów w mieszaninie.

W celu realizacji pierwszej metody prognozowania wyników wzbogacania polskich rud miedzi należy skonstruować krzywą wzbogalności mieszaniny typów litologicznych

na podstawie otrzymanych w laboratorium krzywych wzbogacalności rozpatrywanych typów litologicznych występujących w rudzie. Dla rozróżnienia krzywych wzbogacalności otrzymanych różnymi sposobami (obliczeniowo i bezpośrednio) wprowadzimy interpretację słów: mieszanina i mieszanka typów. Przez mieszaninę będziemy rozumieć teoretyczne (rachunkowe) połączenia składników, zgodnie z zasadami, wyników reprezentujących składowe a przez mieszankę fizyczne połączenie składników.

Krzywą wzbogacalności mieszaniny można uzyskać opierając się na bezpośrednich wynikach flotacji frakcjonowanych, przy odbieraniu koncentratów w identycznych (dla typów) czasach lub metodą aproksymacji zależności $\gamma = \gamma(\beta)$. W obu przypadkach należy uwzględnić udziały typów litologicznych w mieszaninie.

Krzywe wzbogacalności można aproksymować wzorami:

$$\gamma = \frac{a}{\beta} + b \quad (1)$$

wychód γ w zależności od zawartości miedzi w koncentracie β wyznaczonej jako średnia ważona:

$$\gamma = a\beta^{-b} \quad (2)$$

$$\gamma = a(\beta - \alpha)^{-b} \quad (3)$$

$$\gamma = ae^{-c\beta} \quad (4)$$

gdzie:

a, b, c — parametry wzorów,
 α — zawartość miedzi w nadawie.

Przyjęcie danego wzoru uzależnione jest od dokładności aproksymacji mierzonej odchyleniem resztowym, obliczonym według wzoru:

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_{rz} - \gamma_{ob})^2}{n - k}} \quad (5)$$

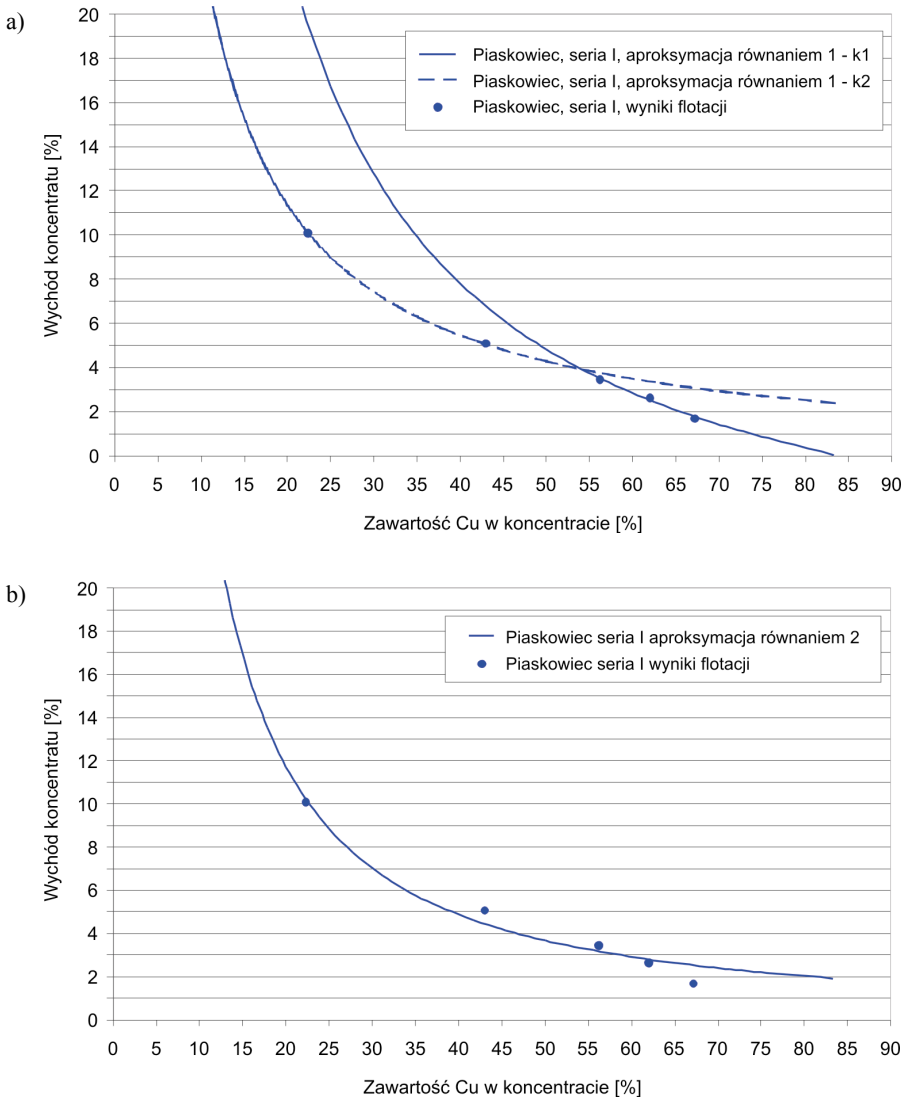
gdzie:

γ_{rz} — rzeczywista wartość wychodu koncentratu,
 γ_{ob} — wartość wychodu uzyskanego ze wzoru aproksymującego,
 k — liczba parametrów we wzorze aproksymującym,
 n — liczba używanych wartości γ_{rz} przy aproksymacji.

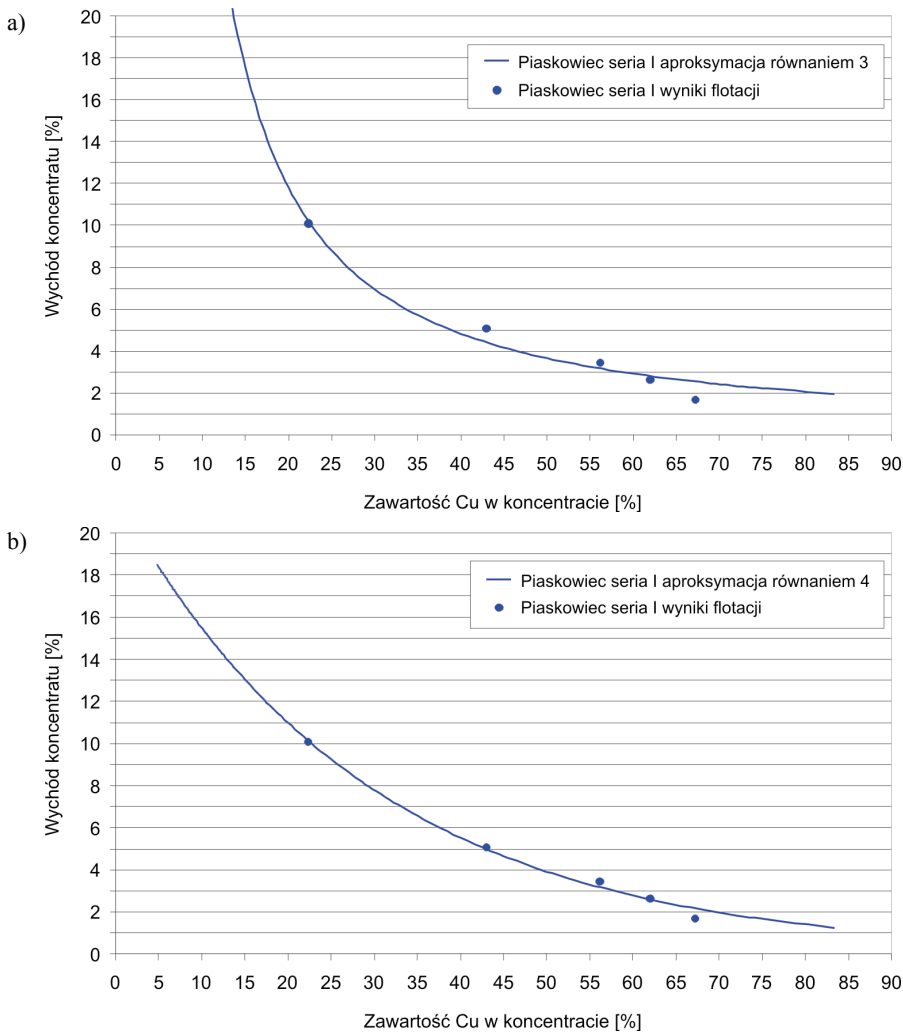
Warto zauważyć, że prezentowane wzory są przybliżeniem rzeczywistych postaci krzywych wzbogacalności, które są nieznane (nie zostały wyprowadzone teoretycznie). Przyję-

cie wzoru prowadzi także do określonych konsekwencji, np. przyjęcie wzoru (1) powoduje, że uzysk ϵ w funkcji β jest charakteryzowany prostą. Na rysunku 1 i 2 przedstawiono wyniki aproksymacji rzeczywistej zależności $\gamma = \gamma(\beta)$ wzorami (1)–(4). Ze względu na skutki stosowania wzoru (1) opisane wyżej zastosowano aproksymację dwoma hiperbolami (rys. 1a).

Generalnie należy przypomnieć, że wzory aproksymacyjne powinny być stosowane tylko w pewnych granicach wartości β , tzn. w przedziałach $(\beta_{\min}, \beta_{\max})$, wymagających dokładnego określenia.



Rys. 1. Aproksymacja zależności $\gamma = \gamma(\beta)$ wzorami: a — (1), b — (2)



Rys. 2. Aproksymacja zależności $\gamma = \gamma(\beta)$ wzorami: a — (3), b — (4)

Niezależność rozdrabniania poszczególnych typów litologicznych jest założeniem, które w rzeczywistości jest niespełnione, przy czym trzeba zaznaczyć, że brak jest wyczerpujących badań w tym zakresie. Aby uniknąć teoretycznego tworzenia mieszanek należałoby wykonać sporą serię flotacji laboratoryjnych dla rzeczywistych mieszanek typów i dalsze rozważania poprowadzić w sposób zasygnalizowany wyżej.

Drugim sposobem algorytmizacji prognozowania może być podejście następujące:

- rozflotować uśrednione za zmianę próbki koncentratu końcowego i odpadów i wykreślić krzywe wiążące zawartości z uzyskiem lub wychodem. Przykładem krzywej takiego typu jest krzywa Madeja [11] mająca kształt paraboli;

- uzależnić parametry opisujące krzywą od udziałów typów litologicznych w nadawie, co powinno pozwolić na przewidywanie skutków wzbogacania, przy znanym składzie litologicznym nadawy.

Założenia występujące przy pierwszej metodzie są w dalszym ciągu ważne, z wyjątkiem założenia o niezależności rozdrabniania.

W przypadku stosowania drugiej metody prognozy można użyć wzorów określających krzywe Halbicha, Della, Madeja lub Fuerstenaua, wiążące ε z wartościami β lub uzyskiem pozostałych składników ε_r .

Krzywa Madeja jest reprezentowana równaniem:

$$\eta = 1 - \varepsilon = a(\beta - \alpha) + b(\beta - \alpha)^2 + c(\beta - \alpha)^3 + d \quad (6)$$

i uzyskiwana jest, z reguły, poprzez rozflotowanie wytworzonych w warunkach przemysłowych koncentratu i odpadów.

Krzywa Fuerstenaua, w ujęciu Drzymały, ma postać:

$$\varepsilon = a \frac{100 - \varepsilon_r}{a - \varepsilon_r} \quad (7)$$

gdzie

$$\varepsilon_r = 100 - \gamma \frac{100 - \beta}{100 - \alpha}$$

i oznacza uzysk pozostałych składników (poza reprezentowanym przez β) w koncentracie.

Krzywa Della [1, 2] posiada swoją postać matematyczną, opartą na aproksymacji hiperbolą krzywej uzyskiwanej z danych doświadczalnych w układzie

$$\left(100 - \varepsilon, \frac{100(\beta_t - \beta)}{\beta_t - \alpha} \right),$$

gdzie β_t jest zawartością miedzi w czystym mineralu (w przypadku polskich rud miedzi, tzw. graniczna zawartość teoretyczna (GTZ) — uśredniona zawartość miedzi w występujących w rudzie minerałach miedzi), co prowadzi do wzoru:

$$\beta = \beta_t - \frac{\beta_t - \alpha}{100} \left(\frac{A\varepsilon}{100 + A - \varepsilon} \right) \quad (8)$$

gdzie A można wyznaczyć metodą najmniejszych kwadratów.

W dalszej części przedstawimy wybrane elementy weryfikacji założeń prezentowanych metod oraz niektóre rozwiązania szczegółowe związane z ich realizacją.

3. Elementy weryfikacji założeń metod prognozowania wzbogacania rud miedzi

3.1. Niezmiennność typów litologicznych rud

Do oceny niezmienności typów litologicznych rud miedzi w LGOM-ie użyto wyników badań trzech próbek pochodzących z wybranego rejonu (tab. 1). Analiza tych wyników prowadzi do wniosku, że pomimo dość zbieżnych ocen wartości GTZ trudno uznać poszczególne próbki za powtarzalne. Zauważa się istotne różnice w udziałach (ilościach, wychodach) siarczaków w poszczególnych próbach, osiągających nawet 50%, dużą zmienność zawartości chalcocynu i kowelinu.

Ustalenie udziałów poszczególnych typów litologicznych w rudach jest problemem trudnym, zależnym w dużym stopniu od metodyki pobierania prób (próba geologiczna, próba z taśmociągu). Można przyjąć, że oceny dokonane na podstawie próby geologicznej są w wysokim stopniu rzetelne, natomiast próby z taśmociągów dają wyniki obarczone dużymi błędami. Podstawą zaliczenia ziaren do typu litologicznego jest ocena mineraloga, która, z reguły, dotyczy ziaren grubszych a ziarna drobne są pomijane. Tabela 2 przedstawia pewną średnią ocenę udziałów typów litologicznych w nadawie poszczególnych Rejonów, przy czym warto zauważyć, że zmienność tych udziałów jest wysoka [15].

3.2. Niezależność rozdrabniania typów litologicznych w mieszance

Warunkiem uzasadnionego porównywania wyników wzbogacania typów litologicznych z wynikami wzbogacania mieszanek są jednakowe sposoby przygotowania próbek do badań flotacyjnych, tzn. osiąganie porównywalnych ich składów ziarnowych.

Na podstawie zaprezentowanej tabeli 3, zawierającej indeksy pracy Bonda można stwierdzić, że poszczególne typy litologiczne rozdrabniają się w różnym tempie (osiągnięcie określonego uziarnienia następuje po różnych czasach). Indeksy pracy dla mieszanek także różnią się od indeksów pracy dla typów i dla różnych ich udziałów. Różnice w składach ziarnowych prowadzą do różnic w stopniach uwolnienia minerałów decydujących o przebiegu flotacji.

3.3. Niezależność przebiegu flotacji

Jeżeli chcemy realizować prognozowanie wyników wzbogacalności i wzbogacania w oparciu o podstawowe krzywe wzbogacalności musimy uzyskać obliczeniowo omawiane krzywe dla mieszaniny i dokonać porównania z rzeczywiście uzyskiwanymi krzywymi dla mieszanek obliczeniowo krzywe wzbogacalności można uzyskać dwoma sposobami:

- łącząc koncentraty flotacji frakcjonowanej uzyskiwane po tych samych czasach flotacji dla poszczególnych typów litologicznych. Mamy wtedy masy koncentratów m_1 , m_2 i m_3 , które odniesione do $M_1 \approx M_2 \approx M_3$, czyli mas nadaw dają wychody koncentratów o zawartościach β_1 , β_2 , β_3 .

TABELA 1
Udziały siarczków miedzi w badanych trzech próbkach typów litologicznych w rejonie X

Próbka minerał	Ilość kruszców Cu%	Bornit CuFeS ₄	Chalkozyn Cu ₂ S	Chalkopiryt CuFeS ₂	Kowelin CuS	Tennantyt Cu ₁₂ As ₄ S ₁₃	GTZ Cu
Piaskowiec	3,20	20,41	74,45	3,24	1,37	0,53	74,71
Piaskowiec	3,21	19,41	74,02	2,21	4,37	0,00	75,09
Piaskowiec	2,29	29,57	66,34	1,73	1,96	0,40	73,83
Dolomit	1,42	27,28	63,98	4,96	3,20	0,59	72,53
Dolomit	2,54	53,26	40,21	3,07	3,46	0,00	69,20
Dolomit	1,54	32,57	50,40	12,01	3,97	1,05	68,22
Łupek	7,43	31,40	52,02	8,68	6,73	1,18	69,52
Łupek	4,43	37,46	60,78	1,63	0,00	0,13	72,91
Łupek	5,11	36,47	51,16	5,38	6,44	0,54	70,39

TABELA 2

Średni skład litologiczny urobku dostarczanego do O/ZWR

Rejon		Piaskowiec	Węglany	Łupek
Lubin	I ciąg	39,30	52,90	7,80
	II ciąg	72,00	22,00	6,00
Rudna	Str. A	70,90	21,50	7,60
	Str. B	42,90	44,70	12,40
Polkowice		13,50	72,60	13,90

TABELA 3

Wartości indeksów pracy Bonda uzyskiwane w różnych laboratoriach [15]

Typ litologiczny rudy miedzi	Lab. A	Lab. B
	Indeksy pracy W_{is} [kWh/Mg]	
Piaskowiec	16,9	16,9
Dolomit	10,7	9,5
Łupek	15,9	14,8
Mieszanka 1 (75%p, 15%d, 10%ł)	–	12,2
Mieszanka 2 (65%p, 20%d, 15%ł)	–	10,8
Mieszanka 3 (55%p, 25%d, 20%ł)	–	10,96

Po połączeniu otrzymujemy:

$$\gamma_m = a_1\gamma_1 + a_2\gamma_2 + a_3\gamma_3$$

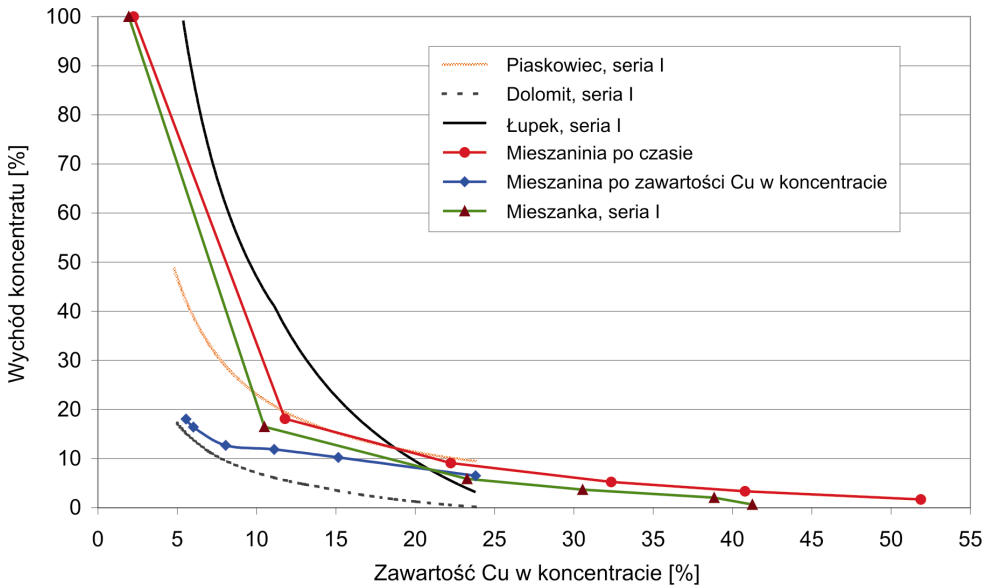
oraz

$$\beta_n = \frac{a_1\gamma_1\beta_1 + a_2\gamma_2\beta_2 + a_3\gamma_3\beta_3}{a_1\gamma_1 + a_2\gamma_2 + a_3\gamma_3},$$

gdzie a_1 , a_2 i a_3 są udziałami trzech typów litologicznych w nadawie (mieszaniu), indeks m oznacza mieszankę;

- po przeprowadzeniu aproksymacji analitycznej lub wykresnej — krzywych $\gamma = \gamma(\beta)$ dla flotacji frakcjonowanej typów litologicznych, przy zadanych wartościach β odczytać wychody γ i ustalić ich średnią ważoną, wykorzystując udziały typów w rudzie jako wagi. Tak stworzona krzywa wzbogacalności będzie reprezentować krzywą dla mieszanki.

Na rysunku 3 przedstawiono zespół krzywych $\gamma = \gamma(\beta)$ uzyskanych w wyniku eksperymentów (krzywe dla piaskowca, dolomitu, łupka i mieszanki) oraz krzywe dla mieszanin wyznaczone obliczeniowo opisanymi metodami. Okazuje się, że krzywe dla mieszaniny oraz mieszanki nie pokrywają się. Dowodzi to, między innymi, że przygotowanie nadaw (mielecie typów litologicznych łącznie i oddzielnie) nie przebiega identycznie oraz że wyznaczanie wartości γ na podstawie aproksymacji zależności $\gamma = \gamma(\beta)$ wprowadza znaczne różnice między krzywymi dla mieszanin.



Rys. 3. Zespół krzywych $\gamma = \gamma(\beta)$ uzyskanych w wyniku eksperymentów lub składania krzywych podstawowych

Dalszym etapem prognozowania wyników wzbogacania byłoby uzyskanie możliwości wyznaczenia krzywej wzbogacania $\gamma = \gamma(\beta)$ uzyskiwanej z rozflotowania uzyskanego koncentratu przemysłowego. Wykonana przez autorów [4] analiza wzbogalności przemysłowej w oparciu o krzywe Fuerstenaua, wykazała że opis przy użyciu równania $\varepsilon = a \frac{(100 - \varepsilon_r)}{(a - \varepsilon_r)}$

jest mało efektywny i wymaga wprowadzenia odpowiedniej modyfikacji uwzględniającej specyficzną charakterystykę wzbogalności przemysłowej. Ponieważ krzywe wzbogalności przemysłowej rud z bieżącej produkcji wszystkich Rejonów O/ZWR są z reguły niesymetryczne, co jest powodem że równanie ze stałą a nie jest wystarczające do ich opisu, jest ono jednak dobrym równaniem wyjściowym do wyprowadzenia innego uniwersalnego równania, także o jednym dopasowywanym parametrze. Równanie to powinno uwzględniać fakt, że ramiona krzywych wzbogalności przemysłowej rud z bieżącej produkcji na

wykresie Fuerstenaua są zgięte w stosunku do krzywej symetrycznej. Autorzy zaproponowali równanie postaci:

$$\varepsilon_r = a' \frac{(100 - \varepsilon)}{(a' - \varepsilon)} - 0,07 (\varepsilon_{r(a)} - 95,5)^2 (100 - \varepsilon_{r(a)}),$$

które daje najlepsze dopasowanie z przemysłową wzbogalnością rud. Zaproponowane równanie pozwala dokonać oceny separacji i wyznaczyć punkt separacji technologicznie optymalnej, co jest jego niewątpliwą zaletą.

4. Uwagi ogólne i końcowe

Generalnie rzecz biorąc, takie wyznaczanie (określenie) krzywej powinno przebiegać na zasadzie uzależnienia parametrów krzywych od wielkości udziałów typów litologicznych w rudzie oraz ich charakterystyk — średniej zawartości α w badanym typie litologicznym, ewentualnie wartości GTZ (β).

Jeżeli przez C oznaczymy parametr we wzorze aproksymującym zależność $\gamma = \gamma(\beta)$, to należałoby uzyskać zależności $C = (a_1, a_2, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13})$, gdzie $a_i, \alpha_i, \beta_{ii}$ oznaczają udział, średnią zawartość oraz β_i w i -tej frakcji litologicznej. Ocena postaci zależności oraz istotności współczynników musi być wynikiem poszerzonych badań eksperymentalnych.

Wydaje się, że pełna prognoza wyników wzbogacania oparta na wyjściu od analiz typów litologicznych (charakterystyki furty eksploatacyjnej), ich złożeniu i przetworzeniu na dane z rozflotowania koncentratu wymaga za dużo aproksymacji i narastające błędy będą uniemożliwiać przyjęcie wyników prognoz za wiarygodne. Jeżeli zastosujemy metodykę aproksymacji z wykorzystaniem charakterystyk typów litologicznych i ich udziałów w przeliczeniu krzywych wzbogalności mieszanki na wyniki przemysłowe to można liczyć na powodzenie takich operacji.

Bez określenia wzajemnego wpływu zmiennych parametrów nadawy na wyniki wzbogacania utrudnione będzie określenie charakterystyki wzbogalności rudy o danym składzie litologiczno-mineralogicznym. Dotychczasowe badania wskazują na konieczność wprowadzenia odpowiednio dobranych procedur i krzywych wzbogacania w celu oceny przebiegu procesu wzbogacania przemysłowego. O przydatność danej krzywej wzbogacania, decyduje możliwość łatwego matematycznego opisu wyników separacji za pomocą prostych równań, oraz określenie punktów optymalnych z technologicznego punktu widzenia.

LITERATURA

- [1] Dell C.C.: An expression for the degree of liberation of an ore, Trans. Inst. Min. Metall., Sec. C. Miner. Process. Extr. Metal. 78, pp. C152–C153, 1969
- [2] Dell C.C.: Release analysis – a comparison of techniques, Trans. Inst. Min. Metall., Sec. C Miner. Process. Extr. Metal. 81, pp. C89–C96, 1972

- [3] *Drzymala J., Ahmed H.A.M.*: Mathematical equations for approximation of separation results using the Fuerstenau upgrading curves, *Int. J. Miner. Process.*, vol. 76, pp. 55–65, 2005
- [4] *Drzymala J., Foszcz D., Łuszczkiewicz A.*: Ocena przemysłowego wzbogacania rud, *Cuprum*, no. 1, 2, 2009
- [5] *Drzymala J.*: Atlas of upgrading curves used in separation and mineral science and technology, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 40, pp. 19–26, 2006
- [6] *Drzymala J.*: Atlas of upgrading curves used in separation and mineral science and technology, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 41, pp. 27–35, 2007
- [7] *Drzymala J.*: Atlas of upgrading curves used in separation and mineral science and technology, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 42, pp. 75–84, 2008
- [8] *Drzymala J.*: Evaluation and comparison of separation performance for varying feed composition and scattered separation results, *Int. J. Miner. Process.*, vol. 75, pp. 189–196, 2005
- [9] *Hall W.B.*: The mathematical form of separation curves based on two known ore parameters and a single liberation coefficient, *Trans. Inst. Mining and Met.*, sec. C, vol. 80, no. 781, pp. 213–221, 1971
- [10] *Jowett A.*: Formula for the technical efficiency of mineral separation, *Int. J. Miner. Process.*, vol. 2, pp. 287–301, 1975
- [11] *Madej W.*: Ocena procesów wzbogacania, *Prace Instytutu Metali Nieżelaznych*, tom VII, no. 3/78, pp. 105–113, 1978
- [12] *Pudło W.*: O pewnej metodzie aproksymowania krzywych wzbogalności, *Zeszyty Problemowe Górnictwa PAN*, z. 2, vol. 9, pp. 83–103, 1971
- [13] *Saramak D.*: Model ekonometryczny działalności KGHM Polska Miedź S.A. jako sposób optymalizacji procesów wzbogacania rud, *Inżynieria Mineralna, Zeszyt Specjalny*, no. 3, pp. 55–63, 2003
- [14] *Tumidajski T., Saramak D., Niedoba T.*: Matematyczne aspekty opisu i oceny wzbogalności rud miedzi, *Górnictwo i Geoinżynieria*, z. 4, pp. 97–106, 2007
- [15] *Tumidajski T., Kasińska-Pilut E., Gawenda T., Naziemiec Z., Pilut R.*: Badania energochłonności procesu mielenia oraz podatności na rozdrabnianie składników litologicznych polskich rud miedzi, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, vol. 26, 2010