

Kazimierz St. SZTABA*

STOPIEŃ SEGREGACJI JAKO PODSTAWA OCENY SKUTECZNOŚCI TECHNOLOGICZNEJ PROCESÓW PRZERÓBK I JAKOŚCI JEJ PRODUKTÓW

Operacje i procesy technologiczne przeróbki i przetwarzania kopalin wymagają kontroli skuteczności technologicznej. Kontroli wymaga także jakość produktów tych procesów określana z reguły na podstawie ich wybranych charakterystyk. Skuteczność technologiczna operacji i procesów jest pojęciem bardziej złożonym. Najczęściej określa się ją na podstawie porównania osiągniętych wyników procesu z wynikami teoretycznie możliwymi lub zakładanymi. Jednak praktyczne przeprowadzanie takiego porównania i interpretacja jego wyników, zależą od szeregu założeń szczegółowych. Założenia kompleksowego wykorzystania surowca pierwotnego uzasadniają przyjęcie za jedną z najważniejszych podstaw oceny skuteczności procesu, osiągniętej w nim dokładności rozdziału materiału nadawy na poszczególne produkty. Istnieją metody pozwalające ocenić, na ile dokładnie został wydzielony jeden, wybrany składnik w stosunku do innych. Nie pozwalają one jednak określić skuteczności procesu łącznie – ze względu na wyselekcjonowanie wszystkich interesujących składników. Autor niniejszego artykułu proponuje zastosowanie do takich celów, oceny stopnia segregacji. Segregacja to samorzutne koncentrowanie się ziarn niejednorodnego materiału uziarnionego, wyróżniających się określonymi wartościami pewnych cech, w wyodrębnionych częściach obszaru zajętego przez ten materiał. Segregacja jest zjawiskiem wybitnie niepożądanym w przypadku materiału przeznaczonego do dalszego przetwarzania lub sprzedaży. Można przyjąć, że segregacja jest zjawiskiem przeciwnym w stosunku do uśredniania. Pod względem formalnym wszystkie procesy rozdzielcze występujące w technologiach mineralnych, są identyczne z segregacją, tyle tylko, że są wywoływane w sposób celowy i kontrolowany. Pozwala to zastosować do oceny ich dokładności stopień segregacji. Metoda jest oparta na analizie parametrów rozkładu dowolnych, mierzalnych cech materiału w zajętej przez niego przestrzeni. Ocenie może podlegać jednocześnie dowolna liczba cech.

WPROWADZENIE

Kopalinę wydobytą ze złóż, a także w wielu przypadkach produkty wstępnych etapów ich utylizacji, nie posiadają właściwości umożliwiających ich bezpośrednie wykorzystanie do rozmaitych celów. Wymagają one poddawania procedurom technologicznym nadającym im pożądane cechy. Te procedury stanowią wstępną fazę utylizacji kopalin i obejmują jej etap określany jako przeróbka kopalin. Analogiczna

*Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Górniczy, Zakład Przeróbki Kopalin, Ochrony Środowiska i Utylizacji Odpadów, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

wstępna faza musi rozpoczynać także utylizację wszelkich surowców wtórnych, powstających przede wszystkim z odpadów różnych etapów utylizacji materiałów pierwotnych. Wszelkie operacje technologiczne realizowane w celu nadania surowcom kopalnym niezbędnych cech użytkowych, a także procesy technologiczne będące zespołami operacji jednostkowych, wymagają kontroli skuteczności technologicznej. Z oczywistych względów kontroli wymaga także jakość produktów tych procesów. Jakość produktów określa się w zasadzie jednoznacznie, oznaczając ich wybrane charakterystyki i oceniając zgodność wartości tych ostatnich z wymaganiami odbiorców. Skuteczność technologiczna operacji i procesów jest natomiast pojęciem bardziej złożonym. Formalnie określa się ją na podstawie porównania osiągniętych wyników z wynikami teoretycznie możliwymi lub – w praktyce częściej – zakładanymi. Praktyczne określanie takich wyników i ich interpretacja zależą jednak od szeregu warunków i założeń szczegółowych. Wynikiem wielkiej różnorodności takich założeń, określanych stosownie do ściśle określonych celów prowadzenia danego procesu, jest – znany z literatury i praktyki – bardzo liczny zespół metod szacowania owej skuteczności i jej przedstawiania ilościowego (Barskij i Plaksin, 1967; Barskij i Rubinstein, 1970; Sztaba, 1970 a). Wyodrębnia się szereg grup takich metod, różniących się pomiędzy sobą założeniami podstawowymi. Ze względu na możliwości doskonalenia procesów technologicznych zarówno w kierunku podwyższania jakości produktów, jak i zwiększania stopnia wykorzystania kopaliny – nadawy procesów utylizacyjnych – za najważniejszą podstawę oceny skuteczności konkretnego procesu należałoby uznać osiąganą w nim dokładność rozdziału materiału nadawy na produkty (zwłaszcza koncentraty zawierające poszczególne składniki tej nadawy), wyodrębniane stosownie do założeń użytkowych. Dokładność tę należy traktować relatywnie: największe znaczenie ma ona w odniesieniu do najcenniejszych składników wejściowego surowca mineralnego – kopaliny. Niemniej, ocena procesu z punktu widzenia stopnia wyodrębnienia wszystkich znaczących gospodarczo składników – kompleksowego wykorzystania surowca (Sztaba, 1970 b) – wymaga zastosowania metod pozwalających na uwzględnianie jako danych wejściowych nie tylko jakości oddzielnych produktów, lecz też rozkładu składników surowca pomiędzy te produkty. Istnieją sposoby – np. rzadko stosowane obliczanie wskaźników selekcji (Stępiński, 1964) – pozwalające ocenić, na ile dokładnie został wydzielony jeden, wybrany składnik w stosunku do innych, np. szczególnie niepożądanych w późniejszych etapach przetwarzania produktu (w procesach metalurgicznych, technologii chemicznej, produkcji energii w elektrowniach cieplnych itp.). Nie pozwalają one jednak ocenić skuteczności procesu łącznie – ze względu na wyselekcjonowanie wszystkich interesujących składników. W niniejszym opracowaniu autor proponuje zastosowanie do takich celów, metody oceny stopnia segregacji (Sztaba, 1993). W opracowaniu podaje się podstawy oceny stopnia segregacji oraz zasady jego stosowania do omówionych celów.

SEGREGACJA

Segregacja polega na samorzutnym koncentrowaniu się ziarn niejednorodnego materiału uziarnionego wyróżniających się określonymi wartościami pewnych cech fizycznych – masy i warunkujących ją: wielkości i gęstości, kształtu, rzadziej innych – w wyodrębnionych częściach obszaru zajętego przez ten materiał (zbiornika, zwał, strumienia transportowego itp.). Takim materiałem jest każdy stały surowiec naturalny, w szczególności mineralny. Zwłaszcza w stanie nieprzetworzonym – surowym

– niejednorodność właściwości sprzyjających segregacji może być bardzo znaczna. Segregacja jest zjawiskiem wybitnie niepożądanym w przypadku materiału przeznaczonego do przetwarzania, ale także do sprzedaży – zmniejsza ona jednorodność jego właściwości.

Segregacja jest zjawiskiem powszechnym, towarzyszącym wszelkim procedurom w jakich przerabia się – przetwarza, transportuje, składa itp. – niejednorodny materiał uziarniony. Z podanych już powodów występuje ona w szczególności w procesach technologicznych (przetwarzanie) i transportowych (przenoszenie i składowanie) surowców mineralnych. Warunki występowania segregacji i stopień jaki osiąga, są już dość ściśle opisane jakościowo (Sztaba, 1963). Nie można tego jeszcze powiedzieć o opisie ilościowym – modelu matematycznym segregacji. Jej występowanie jest jednym z głównych czynników utrudniających uśrednianie materiału. Można powiedzieć, że segregacja jest procesem przeciwnym w stosunku do uśredniania. Uśrednianie jako operacja technologiczna (możliwa do częściowej realizacji także w toku niektórych operacji transportowych) odgrywa ważną rolę w przygotowywaniu nadaw procesów technologicznych przeróbki surowców mineralnych oraz zapewnianiu stałości właściwości ich produktów rynkowych. Stąd duża uwaga z jaką traktuje się ten proces i liczne, poświęcone mu opracowania (Stręk, 1991; Strzelecki i in., 1996; etc). Segregację wspomina się w niektórych takich opracowaniach w zasadzie tylko jako jedno z uwarunkowań operacji uśredniania. Tylko nieliczne opracowania i prace badawcze dotyczą ściśle segregacji (Nowak, 1990; Sztaba i in., 1986-1990; Sztaba, 1993). Wypada jeszcze zauważyć, że opracowania dotyczące uśredniania można dość wyraźnie podzielić na rozpatrujące stronę teoretyczną procesu (np. Strzelecki i in., 1996) i na eksponujące w większym stopniu problemy praktyczne (np. Stręk, 1991). Charakterystyczne, że o praktycznych możliwościach oceny stopnia uśrednienia traktują przede wszystkim owe opracowania „praktyczne”. Autorowi niniejszego opracowania nie są natomiast znane propozycje oceny stopnia segregacji.

Na tle przytoczonych informacji ogólnych łatwo zauważyć, że pod względem formalnym wszystkie procesy rozdzielcze występujące w technologiach mineralnych, począwszy od przeróbki kopaliny, są identyczne z segregacją. W przeciwieństwie do segregacji naturalnej – samorzutnej – tu jest ona wywoływana w sposób celowy

i kontrolowany. Owa identyczność pozwala zaproponować do oceny ich skuteczności metodę oceny stopnia segregacji.

OCENA ILOŚCIOWA STOPNIA SEGREGACJI

Metoda oceny stopnia segregacji zaproponowana przez autora (Sztaba, 1993) jest oparta na analizie parametrów rozkładu dowolnych, mierzalnych cech materiału w zajęтым przezeń obszarze. W wyniku obszernych rozważań na temat wyboru sposobu oceny stopnia segregacji (S) i – zgodnie z poprzednimi uwagami o jej związku z uśrednianiem – stopnia uśrednienia (H), jako najprostszą możliwość pozwalającą ocenić obie te wielkości w odniesieniu do wybranej cechy (a) materiału, przyjęto

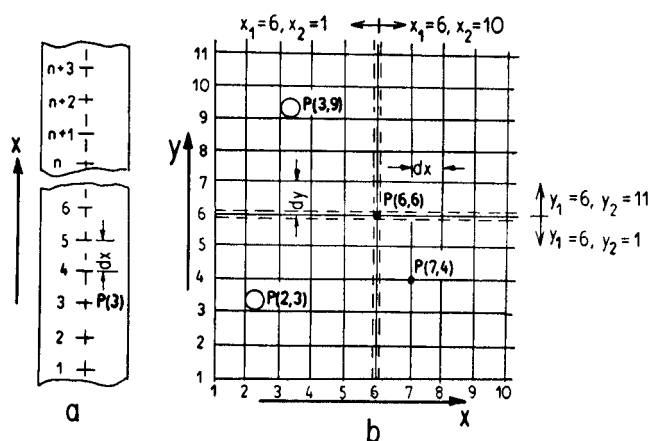
$$S = \frac{I}{H} = \frac{\sigma}{\sigma'} \quad (1)$$

gdzie: σ – odchylenie standardowe wybranej cechy a w badanym obszarze zajęтым przez dany materiał, σ' – maksymalna wartość odchylenia σ występująca wówczas, gdy wybrany składnik (cecha) jest skoncentrowany w całości w pewnym podobszarze obszaru zajętego przez materiał – w ogólności: gdy materiał jest idealnie rozsegregowany na dające się wyróżnić składniki

Można zauważyć, że zawsze będzie zachodziła relacja: $\sigma \leq \sigma'$. Wynika stąd, że wartość stopnia segregacji $S \leq 1$, natomiast $H \geq 1$ i w miarę wzrostu stopnia uśrednienia $H \rightarrow \infty$. Zaproponowany sposób oceny będzie więc w przypadku uśredniania odpowiadał coraz to większym trudnościom – w tym rosnącym wydatkom energii – występującym przy prowadzeniu bardzo dokładnego uśredniania. Jest więc adekwatny do rzeczywistych warunków prowadzenia tej operacji, jednak wychodzi poza zakres najchętniej stosowanych wartości podobnych ocen, dla których najczęściej przyjmuje się granice zmienności: 0 – brak sukcesu ocenianej operacji (nie występowanie zjawiska) i 1 (100%) – pełny sukces. Takie własności ma natomiast wskaźnik określony wzorem (1) w stosunku do segregacji. Do obliczenia wartości σ' potrzebne są charakteryzujące materiał ze względu na cechę a , jej wartości: minimalna – a_{\min} , maksymalna – a_{\max} i przeciętna w całym materiale – a_m . Dwie pierwsze wartości ocenia się na podstawie ogólnej charakterystyki materiału i badanej cechy. Jeżeli np. cechą tą jest zawartość wybranej klasy ziarnowej, to jej zawartość maksymalna (ziarna należące do tej klasy) wynosi 100%, a minimalna (ziarna nie należące do tej klasy) – 0%. Zawartość średnią otrzymuje się z analizy granulometrycznej. W przypadku rudy metalu, wartość minimalna to zawartość metalu w czystych ziarnach skały płonnej (zwykle śladowa – tzw. wartość tła), maksymalna – w czystych ziarnach minerału kruszcowego, a średnią otrzymuje się z analizy chemicznej reprezentatywnej próbki całego materiału. Wartość σ' oblicza się ze wzoru:

$$\sigma_{r^2} = \frac{(a_{\max} - a_m)(a_m - a_{\min})^2 + (a_m - a_{\min})(a_{\max} - a_m)^2}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (2)$$

Wartości występujące we wzorze (2) zależą wyłącznie od własności materiału. Aby otrzymać drugą występującą we wzorze (1) wartość – σ – zależną również od konfiguracji układu ziarn o różnych wartościach cechy a w badanym obszarze, należy przeprowadzić odpowiednie próbkowanie materiału w tym obszarze. Rysunek 1. przedstawia przykładowe układy punktów próbkowania w obszarach: a – jednowymiarowym (np. materiał na przenośniku) i b – dwuwymiarowym (np. materiał na powierzchni składowiska^{*}).



Rys. 1. Przykłady struktury pola próbkowania do badania stopnia segregacji w obszarze:

a – jednowymiarowym, b – dwuwymiarowym; według: Sztaba, 1993

Fig. 1. Examples of the structure of the sampling field of the examination of the segregation degree in:
 a – one-dimensional area, b – two-dimensional area; according to Sztaba, 1993

Punkty próbkowania ułożone są w oczkach regularnej siatki współrzędnych x, y, \dots o kroku odpowiednio dx, dy, \dots (przykłady współrzędnych punktów pokazano na rys.1) i są identyfikowane przez wartości tych współrzędnych. Przy założeniu losowego układu ziarn na powierzchni badanych nagromadzeń – o dużej ścisłości dla wszelkich naturalnych, usypywanych przypadkowo materiałów uziarnionych o nieregularnych lecz izometrycznych kształtach ziarn – próbkowanie według regularnej siatki zapewnia losowość pobierania próbek. Dodatkowo warunki dotyczą techniki pobierania próbek, zapewniającej ich reprezentatywność, a także wzajemną współmierność mas próbek

^{*} Efektywne wykonanie niezbędnego opróbkowania w obszarze trójwymiarowym – np. w całej pojemności zbiornika – nie jest wykonalne w aktualnych realiach technicznych; teoretycznie sposób postępowania jest taki sam jak w obszarach o mniejszej liczbie wymiarów.

$(q(x,y))$ pobieranych w poszczególnych punktach ($q(x,y) = \text{const}$). Wyniki badania próbek pobranych we wszystkich punktach siatki (w liczbie N – zwykle dużej) – wartości wybranej cechy: $a(x,y)$, służą do obliczenia – w znany sposób – jej wartości przeciętnej (a_m) i odchylenia standardowego (σ)

$$a_m = \frac{\sum_{j=1}^N a(x,y)_j}{N}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (a(x,y)_j - a_m)^2}{N}} \quad (3)$$

gdzie $j = 1, 2, 3, \dots, N$ - numeracja kolejna punktów próbkowania o współrzędnych (x,y) .

Regularny układ punktów próbkowania ułatwia także badanie zjawiska segregacji. Wynik obliczenia wskaźnika S według wzoru (1) nie wystarcza bowiem do stwierdzenia, czy w badanym obszarze występuje tendencja regularnych zmian własności materiału, będąca – poza ogólną niejednorodnością materiału ocenianą przez wartość wskaźnika S – podstawowym atrybutem segregacji. Tendencję tę ujawnia badanie gradientu wybranej cechy materiału w danym obszarze. Do tego celu służy zespół danych: wartości a owej cechy w poszczególnych punktach siatki próbkowania, o współrzędnych (x,y) – patrz rys.1. Składowe wektora gradientu: równoległej do osi x – $g_x(x,y)$ i równoległej do osi y – $g_y(x,y)$, oblicza się z wzorów:

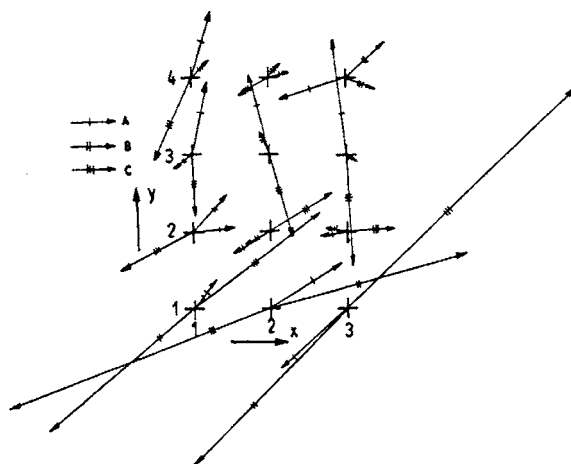
$$g_x(x,y) = \frac{a(x+1,y) - a(x,y)}{dx}, \quad g_y(x,y) = \frac{a(x,y+1) - a(x,y)}{dy} \quad (4)$$

a stąd długość wektora gradientu (wartość gradientu) – d_g – o początku w punkcie (x,y) :

$$d_g(x,y) = \sqrt{g_x^2(x,y) + g_y^2(x,y)} \quad (5)$$

i jego kierunek (kąt nachylenia do osi x) – k_g – określający również kierunek segregacji:

$$k_g(x,y) = \arctg \frac{g_y(x,y)}{g_x(x,y)}$$



Rys.2. Rozkład gradientów zawartości trzech składników (A, B, C) w dwuwymiarowym polu próbkowania (fragment); według: Sztaba, 1993
 Fig. 2. Distribution of gradients of the content of three factors (A, B, C) in the two-dimensional field of sampling (a fragment); according to Sztaba, 1993

Rozważanie szczegółów próbkowania i obliczania wartości omawianych wielkości nie wchodzi w zakres niniejszego opracowania (patrz: Sztaba, 1993). Podstawowe zastosowania metody oceny segregacji do tytułowej oceny efektywności procesów przeróbki, nie wymagają bowiem potwierdzenia występowania segregacji w ścisłym sensie. Wykorzystuje się jedynie ogólną ocenę jej stopnia, otrzymywaną za pomocą wzoru (1). Wartości $a(x,y)$ otrzymane z próbkowania służą w takim przypadku jedynie do obliczania wartości a_m i s według wzorów (3).

Rysunek 2. przedstawia przykładowo graficzny obraz fragmentu powierzchni nagromadzenia pewnego materiału rzeczywistego, dla którego dokonywano oceny stanu segregacji ze względu na trzy różne składniki (w tym przypadku klasy ziarnowe): A, B, C. Można zauważyć, że segregacja ze względu na zróżnicowane składniki (cechy, własności), nie musi występować w taki sam sposób. Jest to dość oczywiste np. w przypadku klas ziarnowych (drobne i grube) i wynika z ogólnych warunków występowania segregacji (Sztaba, 1993).

Ocenie może podlegać jednocześnie dowolna liczba cech – np. zawartości składników – odpowiadających pewnym dość ogólnym warunkom, z reguły spełnianym przez charakterystyki surowców pochodzenia mineralnego. W przypadku kilku cech ocenianych łącznie, użycie hierarchizujących je współczynników o własnościach wag, pozwala na uzyskanie wspomnianej relatywności traktowania różnych cech materiału – np. różnych składników. Modyfikacja metody daje możliwość dokonywania względnej oceny jakości otrzymywanych produktów, co pozwala oceniać tę jakość jako część zadania oceny dokładności rozdziału osiągniętej w danym procesie.

Dysponując wartościami σ i σ' obliczonymi dla całej grupy wzajemnie addytywnych cech danego materiału (np. zawartości wzajemnie wyłączających się składników): $a_i - i = 1, 2, 3, \dots, n$, można ocenić łączną wartość wskaźnika S : \bar{S} , dla całej tej grupy cech. Przypisując poszczególnym cechom z badanej grupy wspomniane już wagi hierarchizujące – w_i – np. średnie zawartości i -tych składników w materiale, oblicza się:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \sigma'^2 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \sigma_i'^2}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \bar{S} = \dots = \frac{\sigma^2}{\sigma'^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^n w_i \sigma_i'^2}} \quad (7)$$

Tak określoną grupową wartość wskaźnika stopnia segregacji – \bar{S} – proponuje się użyć do oceny efektywności procesów rozdzielczych.

PROCES ROZDZIELCZY JAKO SEGREGACJA KONTROLOWANA

Pod pojęciem operacji (procesów) rozdzielczych rozumie się procedury technologiczne, których celem jest osiągnięcie rozdziału nadawy (materiału wejściowego) na co najmniej dwa produkty różniące się między sobą pod względem wybranej cechy (np. zawartości składników, własności fizycznych itp.). W przypadku różnicowania w produktach zawartości składników zwykle zakłada się, że poszczególne z nich

– posiadające własności użytkowe – powinny zostać selektywnie skoncentrowane we właściwych dla nich produktach. Takie określenie dotyczy najważniejszych operacji głównych przeróbki kopaliny*. Operacje te to z reguły: wzbogacanie, gdy ich celem jest skupienie wybranego składnika (składników) nadawy we właściwym dla niego koncentracie, lub klasyfikacja, gdy analogiczny cel dotyczy klas ziarnowych. Jak już wspomniano, wszelkie operacje i procesy rozdzielcze występujące w przeróbce kopaliny i w innych gałęziach technologii, mają cechy segregacji, tyle tylko, że w odróżnieniu od niepożądanego segregacji naturalnej – występującej samorzutnie – przebiegają w sposób celowy – wymuszony i kontrolowany. Zastosowanie do oceny procesów rozdzielczych omawianego tu stopnia segregacji wymaga umownego przyjęcia, że produkty takiego procesu są wyodrębnionymi – wzajemnie rozłącznymi – częściami obszaru zajętego przez materiał. Ewentualna segregacja występująca wewnątrz każdej z takich części nie ma tu żadnego znaczenia, co pozwala uznać je za

* Operacje główne decydują o realizacji podstawowego celu procesu przeróbki w odróżnieniu od operacji przygotowawczych, które umożliwiają przeprowadzenie operacji głównych (np. wstępne lub międzyoperacyjne rozdrabnianie materiału) oraz uzupełniających, nadających produktom procesu pożądane, dodatkowe cechy drugorzędne (np. odwadnianie produktów końcowych).

wewnętrznie jednorodne i opisywać wyłącznie właściwymi dla nich wartościami przeciętnymi wybranych cech oraz kwantyfikatorami ilościowymi (masami, wychodami).

Przy takim założeniu należy tylko wybrać podlegające ocenie cechy materiału rozdzielanego (o wartościach a_i) i określić ich wartości średnie dla poszczególnych k -tych produktów procesu (a_{ki}) – $k = 1, 2, 3, \dots, m$. Tak jako cechy (składniki), jak i jako produkty można przyjmować bądź oddzielnie poszczególne składniki materiału i produkty procesu, bądź ich grupy (jeżeli np. ocenia się złożony proces, w którym powstaje kilka koncentratów – grawitacyjny, flotacyjny itp. – jednego i tego samego składnika, które tworzą łączny koncentrat końcowy). Należy podkreślić, że racjonalnej oceny procesu rozdzielczego można dokonać jedynie pod warunkiem przyjęcia za cechy materiału poddawane analizie takie jego składniki, jakie rzeczywiście podlegają rozdziałowi. W przypadku rud metali będą to więc nie same metale, lecz zawierające je minerały kruszcowe. Obliczenia prowadzi się stosując wzory (1), (2) i (3) – dla każdego składnika oddzielnie oraz (7)

– łącznie dla wszystkich produktów, przy czym występujące w nich wielkości interpretuje się następująco: $a(x,y) = a_{ki}$ – średnie zawartości i -tego składnika w k -tym produkcie, $a_m = a_i$ – średnia zawartość i -tego składnika w nadawie procesu, $w_i = w_k$ – wychód k -tego produktu, $S = E_i$ – wskaźnik skuteczności procesu ze względu na cechę i . W związku z tym wzory (1), (2), (3) i (7) przechodzą w postaci (według kolejności stosowania)

$$\sigma_{i'} = \sqrt{\frac{(a_{\max} - a_i)(a_i - a_{\min})^2 + (a_i - a_{\min})(a_{\max} - a_i)^2}{a_{\max} - a_{\min}}}, \quad E_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{i'}} \quad (8)$$

Tabela 1. Bilans metali w produktach zakładu przemysłowego w dwóch okresach czasu według: Stepiński, 1964

Table 1. The balance of metals in the products of an industrial plant in two periods of time according to Stepiński, 1964

k	Produkt	Zawartość a_i , %							
		Wychód w_i , %	Zn	ZnS	Pb	PbS	Fe	FeS ₂	Ska ³ a
		i	–	1	–	2	–	3	4
Okres I									
–	Nadawa	100,00	17,96	26,73	4,33	4,99	13,78	29,51	38,77
1	Koncentrat cynku	25,00	58,00	88,54	1,00	1,18	3,00	6,59	3,69
2	Koncentrat ołowiu	5,00	3,00	4,50	71,00	82,58	5,00	10,80	2,12
3	Koncentrat żelaza	20,00	5,00	7,31	1,00	1,13	40,00	84,19	7,37
4	Odpady	50,00	4,00	5,82	0,60	0,68	10,00	20,96	72,54
Okres II									
–	Nadawa	100,00	15,01	22,80	3,64	4,20	17,19	36,80	36,20

1	Koncentrat cynku	20,00	58,00	88,54	1,00	1,18	3,00	6,59	3,69
2	Koncentrat ołowiu	4,00	3,00	4,50	71,00	82,58	5,00	10,80	2,12
3	Koncentrat żelaza	30,00	5,00	7,31	1,00	1,13	40,00	84,19	7,37
4	Odpady	46,00	4,00	5,92	0,60	0,69	10,00	21,29	72,10

Tabela 2. Wyniki obliczeń wskaźników segregacji dla danych z tabeli 1
Table 2. The results of calculations of segregation indexes for the data of Table 1

		Okres I				Okres II			
		a_i , %	s_i , %	s'_i , %	E_i	a_i , %	s_i , %	s'_i , %	E_i
1	ZnS	26,73	35,69	44,26	0,8064	22,80	32,88	41,95	0,7838
2	PbS	4,99	17,18	21,77	0,7892	4,20	16,00	20,06	0,7976
3	FeS ₂	29,51	27,99	45,61	0,6137	36,80	31,53	48,23	0,6537
4	Skąła	38,77	33,80	48,72	0,6938	36,20	33,17	48,06	0,6902
E	–	0,7070				0,7046			

W przypadku określania skuteczności procesu ze względu na całą grupę cech (i), stosuje się odpowiednio wzór (7). Dodatkowo należy zauważyć, że obliczone w opisany sposób wartości wskaźnika E (S) bezpośrednio pozwalają na ocenę zbliżenia osiągniętego stopnia rozdziału do rozdziału idealnego. Nie uwzględniają natomiast ani możliwości technologicznych i technicznych, ani zasadności ekonomicznej dążenia do takiego stanu idealnego. Są one pewną miarą, której odosobnione wartości mogą być mniej przydatne w warunkach przemysłowych. Natomiast nie ulegają wątpliwości ich walory jako ocen porównawczych, przy wyborze najkorzystniejszych warunków procesu, ocenie osiągniętego postępu w jego prowadzeniu, porównywaniu wzbogacalności różnych odmian podobnej kopaliny itp. Jeśli natomiast określić dla danej kopaliny stopień w_i ω_i Składnik optymalny ze względu na zbliżenie do idealnego, to wówczas i pojedyncze wartości E oceny procesu mogą mieć znaczenie w warunkach przemysłowych. Odnosi się je wtedy nie do wartości idealnej $E = 1$, lecz do owej optymalnej $E < 1$.

Jako przykład podaje się obliczenie wskaźnika segregacji dla procesów wzbogacania flotacyjnego rudy cynkowo-ołowiowo-żelazowej, z której przed mieleniem wydzielono grawitacyjnie część odpadów. Dane wyjściowe dla dwóch wybranych okresów pracy zakładu podano w tabeli 1. Przyjęto, że cała ilość wydzielanych metali jest zawarta w ich podstawowych minerałach: cynku w sfalerycie – ZnS, o teoretycznej zawartości 67,2% Zn, ołowiu w galenie – PbS, 86,7% Pb, żelaza w pirycie (łącznie z markazytem) – FeS₂, 46,7% Fe. Te minerały wydzielano do odpowiednich koncentratów. Pozostałe minerały (głównie dolomit), nie zawierające metali i wydzielane do odpadów, określono łącznie jako „skąła”. Przy drobnym uziarnieniu nadawy flotacyjnej, występują w znaczących ilościach czyste ziarna poszczególnych minerałów, całkowicie pozbawione tym samym innych rozdzielanych składników. Upoważnia to do przyjęcia dla wszystkich wydzielanych składników

wartości granicznych, potrzebnych do obliczenia wartości σ_i : $a_{\max} = 100\%$ oraz $a_{\min} = 0\%$.

Wyniki obliczeń – przejściowe: σ_i , σ_i i E_i oraz końcowe: E – dla obydwu okresów zestawiono w tabeli 2. Można ocenić, że mimo pewnych – nieznaczących – wahań w jakości przerabianej rudy, zakład pracował stabilnie. Można również ocenić (porównanie poszczególnych wartości E_i), że przeciętnie najbardziej skutecznie rozdzielane są minerały cynkonośne, najmniej – żelazonośne. W razie potrzeby można to spostrzeżenie wykorzystać jako uzasadnienie i ukierunkowanie prac nad doskonaleniem technologii wzbogacania danej rudy.

Uwaga końcowa

Omówiony w niniejszym opracowaniu sposób oceny stopnia segregacji materiału uziarnionego może być użyty do oceny stopnia (efektywności) wszystkich zjawisk – jak segregacja – i działań – jak operacje i procesy rozdzielcze przeróbki kopalnin i innych gałęzi technologii – w których występuje przestrzenne różnicowanie rozkładu mierzalnych cech danego materiału.

LITERATURA

- BARSKIJ, L., A., PLAKSIN, I.N., 1967, *Kryteria optymalizacji procesów rozdzielczych* (w języku rosyjskim), Moskwa, Nauka.
- BARSKIJ, L.A., RUBINSTEIN, J.B., 1970, *Metody cybernetyczne w przeróbce kopalnin użytecznych* (w języku rosyjskim), Moskwa, Nedra.
- NOWAK, K., 1990, *Analiza wpływu wybranych charakterystyk materiału i sposobu usypywania na jego segregację*, Praca dyplomowa, AGH, Kraków.
- STĘPIŃSKI, W., 1964, *Wzbogacanie grawitacyjne*, PWN Łódź–Warszawa–Kraków.
- STRĘK, F., 1991, *Mieszanie i mieszalniki*, WNT Warszawa.
- STRZELECKI, T. (red.) i in., 1996, *Mechanika ośrodków niejednorodnych – Teoria homogenizacji*, Wrocław, DWE.
- SZTABA, K., 1970 a, *Metody określania skuteczności technologicznej procesu klasyfikacji*, Biuletyn Zagadnień Postępu Technicznego i Ekonomiki Górnictwa, Wydawnictwo ZG SITG Katowice 59–66.
- SZTABA, K., 1970 b, *Problemy kompleksowej utylizacji surowców mineralnych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 5, Wrocław 83–91.
- SZTABA, K. i in., 1986–1990, *Badania nad uśrednianiem materiałów uziarnionych* [w:] Sprawozdania z prac badawczych w CPBP nr 03.07.05.09, Biblioteka ZPKOŚiUO AGH Kraków.
- SZTABA, K., 1993, *Segregation of grained material – conditions and possibilities of evaluation*, Proceedings of the XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney 505–509.

Opracowanie wykonano w związku z realizacją w roku 1996, zadań statutowych Zakładu Przeróbki Kopalnin, Ochrony Środowiska i Utylizacji Odpadów – Wydział Górniczy AGH w Krakowie, finansowanych ze środków Komitetu Badań Naukowych – umowa nr 11.100.601.

Niniejsze opracowanie pod tytułem: *Segregation degree as a base of evaluation of technological efficiency of mineral processing processes and of the quality of its products* zostało przyjęte do

przedstawienia na IV International Conference on Clean Technologies for the Mining Industry, które odbędzie się w Santiago (Chile) w dniach od 3 do 15 maja 1998 r.

Sztaba K. S., Segregation degree as a base of evaluation of technological efficiency of mineral processing processes and of the quality of its products. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 32, 57–68 (in Polish)

Operations and technological processes of mineral processing require the control of its technological efficiency. The quality of the products of these processes, determined usually according to their selected characteristics, has to be controlled. The technological efficiency of operations and processes is a very complex notion. Most often it is determined on the basis of comparison of the obtained process results with the theoretically possible or assumed results. Yet a practical execution of such a comparison and interpretation of its results depend on numerous detailed assumptions. The assumptions of the complex utilization of the primary raw material justify the assumption of the precision of distribution of the feed material into respective products to be one of the most important grounds of evaluation of the process efficiency. There are methods which contribute to evaluating how precisely one selected component was selected out of others. They, however, do not determine the efficiency of the process jointly, due to the fact of selecting of all interesting components. The author proposes the evaluation of segregation degree to be applied for such purposes. Segregation is a spontaneous concentration of grains of heterogeneous material in certain parts of the area occupied by the material and the grains are differentiated by certain features. Segregation is a disadvantageous phenomenon in case of the material to be processed or sold. It can be assumed that segregation is a phenomenon contrary to blending. From the formal point of view, all the separation processes occurring in mineral technologies are identical to segregation but they are evoked in a purposeful and controlled way. This contributes to the possibility of applying the segregation degree for evaluating their precision. The method is based upon the analysis of parameters distribution of any measurable material features on the occupied area. Any number of features can be evaluated at the same time.