



Wstępne badania nad możliwością przewidywania parametrów jakościowych odpadów powstających w procesach wzbogacania węgla kamiennych

Ireneusz Baic, Wiesław Blaschke

Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Katowice

Zbigniew Grudziński

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi

i Energią PAN, Kraków

1. Wstęp

Urobek wydobywany w wyniku eksploatacji prowadzonej w kopalniach węgla kamiennego jest zbiorem różnej wielkości ziarn węgla, ziarn skały płonnej, łupków przywęglowych, pirytu, przerostów węglowo-kamiennych. W takiej postaci nie nadaje się do bezpośredniego wykorzystania przez użytkowników. Aby można go było sprzedać jako produkt handlowy musi być poddany procesom przeróbczym.

Gdy parametry jakościowe urobku węglowego (dotyczy to tylko węgla energetycznego) odpowiadają potencjalnym odbiorcom wystarczy go rozsiać i w postaci sortymentów handlowych oferować użytkownikom. Najczęściej jednak, jakość urobku węglowego nie odpowiada wymaganiom jakościowym jego dalszego wykorzystania. W takich przy-

padkach urobek musi być poddany procesom wzbogacania polegającym na rozdziale materiału na koncentrat i odpady.

Produkty odpadowe składają się z ziarn kamienia, łupków, przestostów, piasku podsadzkowego i piryków. Mogą być one produktem handlowym, jeżeli ich parametry jakościowe spełniają wymagania konkretnych odbiorców. Wymagania te mogą być różne w zależności od kierunków zagospodarowania odpadów. Nazwa odpady jest wówczas myląca, ale taka nazwa przyjęła się w górnictwie węgla kamiennego. Bardziej odpowiednim określeniem byłby tutaj produkt pośredni lub produkt odpadowy. Aby określić przydatność takiego produktu należy przeprowadzić jego analizę mineralogiczną.

Skład mineralogiczny odpadów można regulować zmieniając głębokość wzbogacania (różne gęstości rozdziału urobku na poszczególne produkty). W tym celu należy przeprowadzić analizę gęstościową podawanego do wzbogacania materiału i na jej podstawie określić korzystne dla użytkowników parametry jakościowe. Niestety procesy wzbogacania przemysłowego są niedokładne i efekty uzyskiwane w warunkach przemysłowych mogą różnić się od jakości określonej w warunkach laboratoryjnych. Przewidywanie skutków niedokładności procesów wzbogacania, na jakość produktów odpadowych, jest celem niniejszego artykułu.

2. Dokładność procesów wzbogacania

Rozdział węgla surowego w warunkach laboratoryjnych prowadzi się w kadziach wypełnionych roztworami (najczęściej) chlorku cynku. Kadzie ustawia się w kolejności wzrastających gęstości roztworów (przykładowo 1,30; 1,35; 1,40; 1,45; 1,50; 1,60; 1,80; 2,00 g/cm³). Jak łatwo zauważyć prowadzenie rozdziału w ten sposób jest bardzo dokładnym sposobem podzielenia nadawy na frakcje gęstościowe.

W warunkach przemysłowych nie stosuje się roztworów chlorku cynku ze względu na jego własności korodujące. Niezbędną, do rozdziału nadawy na produkty wzbogacania, gęstość rozdziału uzyskuje się stosując mieszaninę wody z tzw. obciążnikami (najczęściej magnetytem) i utrzymując ją w zawieszeniu dzięki odpowiedniemu rozwiązaniu mechanicznemu urządzeń wzbogacających – przepływ cieczy ciężkiej (mieszanki) przez wzbogacalnik. Proces ten nazywany jest wzbogacaniem w cieczach ciężkich.

Do rozdziału nadawy stosuje się też inne rozwiązanie, a mianowicie poddawanie nadawy pulsacyjnemu działaniu strumienia wody. Ziarna podnoszone do góry rozwarstwiają się, a ponieważ w wodzie cięższe ziarna opadają szybciej to po kilku takich cyklach przesuwały się po sicie materiał rozdziela się na warstwy ułożone od najcięższej do najlżejszej. Warstwy te rozdziela się mechanicznie na poszczególne produkty. Proces ten nazywany jest wzbogacaniem w osadzarkach.

Rozdział urobku w warunkach przemysłowych w cieczech ciężkich czy osadzarkach jest, jak łatwo zauważyć, dużo mniej dokładny niż rozdział w warunkach laboratoryjnych. Uzyskiwane rezultaty (zawartości składników) są więc inne niż można się było spodziewać po rezultatach laboratoryjnej analizy densymetrycznej.

Dokładność wzbogacania (rozdział nadawy na poszczególne produkty) zależy od wielu czynników. Do głównych zaliczyć należy: niedokładność pracy wzbogacalnika, wady konstrukcyjne, uszkodzenia elementów maszyny, niedokładność obsługi, niedokładny odbiór produktów, nienajlepiej pracujące automatyczne urządzenia kontroli procesu rozdziału, zmiana składu mineralogicznego nadawy, różnice w wielkości i kształcie ziarn wzbogacanego materiału, wahania w obciążeniu maszyny wzbogacającej, czas przebywania materiału w maszynie, zmiana składu ziarnowego lub gęstościowego nadawy oraz sposób podawania nadawy i mediów (wody, cieczy ciężkiej).

Czynniki wpływające na dokładność rozdziału nadawy na poszczególne produkty powodują, że ziarna o określonej gęstości trafiają do innych produktów niż założone na podstawie badań laboratoryjnych. Zjawisko to nazwane jest rozproszaniem się ziarn. Im stopień rozproszenia się ziarn jest większy tym mniejsza dokładność wzbogacania.

W ubiegłych latach prowadzono szereg prac nad zjawiskiem rozproszenia się ziarn pomiędzy niewłaściwe produkty. Zagadnienie to nie będzie tu omawiane. Zainteresowani czytelnicy mogą sięgnąć do odpowiedniej literatury [1÷4]. W rezultacie prowadzonych badań i analiz teoretycznych zaproponowano, m.in., określanie dokładności wzbogacania tzw. współczynnikiem rozproszenia prawdopodobnego. Inne to metoda trójkąta błędów i inperfekcja. W niniejszej pracy do określenia dokładności wzbogacania wykorzystano współczynnik rozproszenia prawdopodobnego.

Rozproszenie prawdopodobne (oznaczone symbolem E_p – écarte probable) określa przedział gęstości, w którym znajduje się 50% ziarn o gęstości równej przyjętej gęstości rozdziału ziarn na koncentrat i odpady. Stosując zaproponowaną na wstępie nomenklaturę należałoby raczej stwierdzić, że rozproszenie prawdopodobne określa przedział gęstości, w którym znajduje się 50% ziarn o gęstości równej przyjętej gęstości rozdziału ziarn na koncentrat i produkt odpadowy. Przykładowo – jeżeli gęstość rozdziału przyjęto w wysokości $1,60 \text{ g/cm}^3$ to współczynnik rozproszenia prawdopodobnego $E_p = 0,12$ oznacza, że 50% ziarn o gęstości $1,6 \text{ g/cm}^3$ znajdzie się w przedziale gęstości $1,48 \div 1,72 \text{ g/cm}^3$. Dla $E_p = 0,04$, 50% ziarn o gęstości $1,6 \text{ g/cm}^3$ znajdzie się w przedziale $1,56 \div 1,64 \text{ g/cm}^3$. Im mniejsze rozproszenie prawdopodobne tym dokładniejszy sposób wzbogacania.

3. Przewidywanie rezultatów wzbogacania

Rozproszenie się ziarn pomiędzy produktami może mieć charakter rozkładu normalnego (Gaussa), rozkładu normalnego uciętego, lub też przyjmować inny rozkład. Badania Trompa i Terry [3] pokazały, że można z dużą dokładnością przyjąć, że ziarna o różnej gęstości rozpraszają się wg rozkładu normalnego. Założenie to pozwala na przewidywanie rezultatów przemysłowego wzbogacania urobku węglowego na podstawie składu densymetrycznego nadawy i znanego dla danej maszyny współczynnika rozproszenia prawdopodobnego. Współczynniki rozproszenia prawdopodobnego podają grawitacyjnych m.in. producenci wzbogacalników grawitacyjnych zastrzegając, że będzie on utrzymany jeżeli wzbogacalniki będą pracować prawidłowo zgodnie z wymogami technologiczno – technicznymi. Można wyznaczyć doświadczalnie rozproszenie prawdopodobne pracującego już wzbogacalnika analizując składy gęstościowe nadawy, koncentratu i odpadów (produktów odpadowych) [4].

Przewidywanie rezultatów wzbogacania jest złożonym zagadnieniem obliczeniowym. Jeżeli przyjmie się, że rozproszenie ziarn ma charakter rozkładu normalnego to można opracować odpowiedni model matematyczny i komputerowy program obliczeniowy. Przy innych rozkładach trzeba stosować metody graficzne [1].

W niniejszej pracy założono, że rozproszenie ziarn ma charakter rozkładu normalnego. Przyjmując takie założenie, na podstawie tabel

rozkładu normalnego, można wykreślić krzywe całkowite funkcji Gaussa dla różnych parametrów funkcji prawdopodobieństwa (błędu prawdopodobnego). Przy tym założeniu „błąd prawdopodobny” jest „rozproszeniem prawdopodobnym” a krzywe całkowite Gaussa noszą nazwę krzywych rozdziału. Wykreślając krzywe w układzie: oś odciętych – gęstość, a oś rzędnych – względne ilości ziarn trafiające do jednego z produktów i przyjmując, że rzędna 50% krzywej rozdziału odpowiada odciętej równej przyjętej gęstości rozdziału można odczytać z krzywej prawdopodobieństwo nazywanego czasami liczbą rozdziału, trafienia ziarn o gęstościach różniących się od gęstości rozdziału do poszczególnych produktów (koncentrat, produkt odpadowy). Oczywiście suma prawdopodobieństw, ziarn o konkretnej gęstości, trafiających do i koncentratu do produktów odpadowych będzie równa 100.

Dysponując krzywą rozdziału (dla określonego rozproszenia prawdopodobnego) można wyliczyć zawartość poszczególnych składników w koncentracie i w produktach odpadowych – dla dwuproduktowego procesu rozdziału. Dla procesu trójproduktowego trzeba najpierw wyznaczyć rozproszenie prawdopodobne dla każdej granicy rozdziału pomiędzy wydzielanymi produktami. Schemat obliczeń w uproszczeniu jest następujący:

- wyznaczamy przedziały gęstości analizowanych ziarn, w praktyce są to przedziały gęstości przyjęte podczas rozdziału próbki węgla w laboratoryjnych cieczach ciężkich, otrzymując frakcje gęstościowe,
- dla każdej frakcji gęstościowej posiadamy informacje o jej wychodzie (procentowym udziale w całości próby) oraz o zawartości badanego składnika,
- iloczyn zawartości składnika przez jego wychód jest ilością tego składnika we frakcji,
- z krzywej rozdziału odczytuje się względną ilość ziarn (tzw. liczbę rozdziału) konkretnej frakcji trafiającej do produktów odpadowych lub do koncentratu; do odczytów przyjmuje się średnią gęstość każdej frakcji,
- mnożąc otrzymaną liczbę rozdziału (dla określonej frakcji gęstościowej) przez ilość danego składnika (w tej frakcji) otrzymuje się ilości składnika w koncentracie i w produktach odpadowych (suma będzie ilością składnika w tej frakcji),

- sumując ilości składnika przechodzącego z każdej frakcji do określonego produktu otrzymujemy jego ilość w całym produkcie (w koncentracji lub w produktach odpadowych),
- dzieląc ilość składnika przez wychód produktów otrzymuje się zawartość tego składnika w koncentracji lub w produktach odpadowych, a więc jego przewidywaną zawartość.

Ten schemat postępowania jest stosunkowo prosty, choć obliczenia trzeba wykonywać przy pomocy tabeli rozkładu Gaussa pozwalającej na podstawie liczb rozdziałów odczytać liczbowe wartości ($\delta - \Delta$) dla założonego (danego) rozproszenia prawdopodobnego (w tablicach jest to błąd prawdopodobny). Tu należy przypomnieć, że zgodnie z założeniem Terry zależność między dokładnością wzbogacania a rozproszeniem prawdopodobnym jest taka sama jak między dokładnością spostrzeżenia i błędem prawdopodobnym.

Mimo prostoty schematu postępowania przy wykonywaniu obliczeń, same obliczenia są bardzo żmudne i czasochłonne. Należy je wykonywać dla każdej przyjętej gęstości rozdziału na koncentrat i produkty odpadowe. W praktyce z tego powodu obliczenia takie są bardzo rzadko prowadzone.

4. Przewidywanie parametrów jakościowych produktów odpadowych w procesach wzbogacania węgla kamiennego energetycznego

Węgle kamienne energetyczne wzbogaca się w zasadzie dwuproduktowo otrzymując koncentrat i produkty odpadowe. Gęstość rozdziału ustala się na podstawie badań laboratoryjnych przyjmując, jako kryterium parametry jakościowe koncentratu odpowiadające konkretnym użytkownikom tego produktu. Parametry jakościowe produktów odpadowych są wynikiem powyższego założenia.

Tabela 1. Parametry jakościowe produktów odpadowych wydzielonych przy gęstościach 2,0 g/cm³; 1,8 g/cm³; 1,60 g/cm³ dla różnych wskaźników dokładności wzbogacania E_p

Table 1. Quality parameters of waste products isolated at densities 2.0 g/cm³, 1.8 g/cm³, 1.60 g/cm³ for the different indicators of enrichment accuracy E_p

Gęstość rozdziatu g/cm ³	Dokładność rozdziatu E _p	Wychód odpadów γ _%	Zawartość składników [%]										
			A ^a	S _t ^a	Cl ^a	P ^a	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
2,0	0,04	12,8	77,2	3,57	0,80	0,0540	41,8	18,6	7,94	1,20	1,34	0,53	1,88
	0,08	10,6	76,8	3,56	0,80	0,0533	41,5	18,6	7,89	1,20	1,33	0,53	1,87
	0,12	8,9	75,6	3,53	0,80	0,0579	40,8	18,3	7,77	1,20	1,32	0,53	1,84
	0,16	7,7	73,8	3,47	0,80	0,0502	39,7	17,9	7,58	1,18	1,30	0,54	1,80
	0,20	7,4	67,4	3,24	0,78	0,0457	36,0	16,4	6,91	1,13	1,20	0,53	1,63
	0,04	16,3	72,8	3,44	0,80	0,0490	39,1	17,6	7,47	1,18	1,29	0,54	1,78
1,80	0,08	16,1	73,1	3,46	0,80	0,0491	39,2	17,6	7,50	1,18	1,29	0,54	1,78
	0,12	15,7	71,6	3,40	0,80	0,0480	38,3	17,4	7,34	1,17	1,27	0,54	1,74
	0,16	16,0	64,8	3,15	0,77	0,0436	34,5	15,8	6,64	1,10	1,17	0,53	1,57
	0,20	18,2	53,0	2,70	0,72	0,0363	27,9	12,9	5,42	0,97	0,98	0,50	1,26
	0,04	19,1	67,6	3,29	0,79	0,0438	35,9	16,5	6,93	1,14	1,22	0,55	1,65
	0,08	20,3	64,3	3,16	0,79	0,0419	34,1	15,7	6,59	1,11	1,17	0,54	1,56
1,60	0,12	23,9	55,4	2,81	0,74	0,0370	29,1	13,5	5,67	1,01	1,03	0,51	1,33
	0,16	29,5	45,1	2,40	0,68	0,0310	23,4	11,0	4,60	0,89	0,86	0,48	1,06
	0,20	35,0	37,4	2,09	0,64	0,0266	19,2	9,1	3,81	0,80	0,73	0,45	0,86

Produkty odpadowe są poszukiwanym materiałem skalnym wykorzystywanym w wielu gałęziach przemysłu. Dla użytkowników w wielu przypadkach, niezwykle ważnym jest skład mineralny tych produktów. Parametry jakościowe produktów odpadowych, wydzielanych w zakładach wzbogacania węgla, można regulować poprzez wydzielanie produktów pośrednich. Takiej technologii jeszcze się nie prowadzi, gdyż w zakładach przerobczych jeszcze nie zwraca się uwagi na możliwość dostosowania parametrów jakościowych produktów odpadowych do wymagań poszczególnych użytkowników.

Parametry jakościowe (zawartość poszczególnych składników) zależą też będą od dokładności wzbogacania. Przewidywanie parametrów jakościowych produktów odpadów było celem niniejszej pracy. W prezentowanym artykule rozważa się jeden przypadek wzbogacania węgla kamiennego energetycznego wykorzystując dane zamieszczone w publikacji L. Róg [5]. Wykonano w niej analizę densymetryczną nadawy określając szereg interesujących nas składników w każdej frakcji gęstościowej. W niniejszej pracy przyjęto założenie, że węgiel będzie wzbogacany w osadzarce. Nie znając rozproszenia prawdopodobnego takiej osadzarki przyjęto umownie, że będzie się ono wahać w przedziale E_p od 0,04 do 0,20 co 0,04.

Obliczenia wykonano wg schematu opisanego w poprzednich rozdziałach zakładając, że rozproszenie ziarn ma charakter rozkładu normalnego (Gaussa). Założono też, że produkty odpadowe będą wydzielane alternatywnie przy gęstościach rozdziału $2,0 \text{ g/cm}^3$; $1,8 \text{ g/cm}^3$; $1,6 \text{ g/cm}^3$. Rezultaty obliczeń zestawiono w tabeli 1.

5. Podsumowanie

Zaprezentowane w tabeli 1 rezultaty obliczeń pozwalają na przeprowadzenie szczegółowych analiz, w jaki sposób zmieniają się w produktach odpadowych zawartości składników w miarę pogorszenia się dokładności wzbogacania (rozdziału na koncentrat i produkty odpadowe).

I tak przykładowo:

- zakładając, że produkty odpadowe wydziela się przy gęstości rozdziału równej $2,0 \text{ g/cm}^3$ zawartości składników zmieniają się w granicach:
 - zawartość popiołu od 77,2% ($E_p=0,04$) do 67,4% ($E_p=0,20$),
 - zawartość siarki całkowitej od 3,57% ($E_p=0,04$) do 3,24% ($E_p=0,20$),
 - zawartości SiO_2 od 41,8% ($E_p=0,04$) do 36,0% ($E_p=0,20$),
 - zawartości Al_2O_3 od 18,6% ($E_p=0,04$) do 16,4% ($E_p=0,20$),
itd.
- zakładając, że produkty odpadowe wydziela się przy gęstości rozdziału równej $1,8 \text{ g/cm}^3$ zawartości składników zmieniają się w granicach:
 - zawartość popiołu od 72,8% ($E_p=0,04$) do 53,0% ($E_p=0,20$),
 - zawartość siarki całkowitej od 3,44% ($E_p=0,04$) do 2,70% ($E_p=0,20$),
 - zawartości SiO_2 od 39,1% ($E_p=0,04$) do 27,9% ($E_p=0,20$),
 - zawartości Al_2O_3 od 17,6% ($E_p=0,04$) do 12,9% ($E_p=0,20$).
itd.
- zakładając, że produkty odpadowe wydziela się przy gęstości rozdziału równej $1,6 \text{ g/cm}^3$ zawartości składników zmieniają się w granicach:
 - zawartość popiołu od 67,6% ($E_p=0,04$) do 37,4% ($E_p=0,20$),
 - zawartość siarki całkowitej od 3,29% ($E_p=0,04$) do 2,09% ($E_p=0,20$),
 - zawartości SiO_2 od 35,9% ($E_p=0,04$) do 19,2% ($E_p=0,20$),
 - zawartości Al_2O_3 od 16,5% ($E_p=0,04$) do 9,1% ($E_p=0,20$).
itd.

Przeprowadzone, na konkretnym przypadku węgla energetycznego, obliczenia pokazują, że dokładność procesu wzbogacania ma istotny wpływ na zawartość poszczególnych składników w produkcie odpadowym. Dotyczy to głównie zawartości popiołu, siarki, SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O . Inne składniki zmieniają się w mniejszym stopniu, w zależności od przyjętej gęstości rozdziału.

Dokładność wzbogacania ma też wpływ na wychód produktów odpadowych. Im wyższa gęstość rozdziału tym wychody produktów odpadowych maleją, przy niskich gęstościach rozdziału wychody rosną.

Należy też zwrócić uwagę, że im mniejsza gęstość rozdziału pomiędzy koncentratem i produktami odpadowymi tym różnice w zawartości składników, przy różnych dokładnościach wzbogacania, są większe. Jeżeli różnice te będą miały istotny wpływ na wykorzystanie produktów odpadowych przez odbiorców może okazać się konieczne wydzielanie produktów odpadowych o pożądanej zawartości składników i oczywiście koncentratów o żądanej jakości. W takim przypadku konieczne będzie wydzielanie produktów pośrednich wraz z analizą możliwości ich unieszkodliwiania.

Przeprowadzone obliczenia pokazały, że zawartość poszczególnych składników w produktach odpadowych różnią się w skrajnych przypadkach dość znacznie. Powstaje tu pytanie czy różnice te są istotne dla wymagań różnych odbiorców tych produktów.

Procesy wzbogacania węgla należy prowadzić przy jak największej dokładności rozdziału. Dysponując jednak konkretnymi maszynami wzbogacającymi musimy liczyć się z faktem, że przy źle pracujących wzbogacalnikach parametry jakościowe produktów odpadowych będą się zmieniać czasami dość znacznie w porównaniu z rezultatami uzyskiwanymi podczas rozdziału laboratoryjnego.

Obliczenia przeprowadzono, ze względu na ich pracochłonność, na jednym przykładowym węglu. Należałoby podane powyżej wnioski sprawdzić prowadząc analogiczne obliczenia na innych węglach.

Literatura

1. **Blaschke W.:** *Przewidywanie rezultatów wzbogacania węgla*. Zeszyty Naukowe AGH Nr 106, Kraków 1981.
2. **Blaschke W.:** *Przeróbka węgla kamiennego – wzbogacanie grawitacyjne*. Wyd. IGSMiE PAN Kraków 2009.
3. **Budryk W.:** *Wyniki działania płuczek i wialni w świetle teorii*. Przegląd Górniczy Nr 9 i 10, Katowice 1949.
4. **Stępiński W.:** *Wzbogacanie grawitacyjne*. PWN Warszawa 1964.
5. **Róg L.:** *Możliwości wykorzystania zespołów krzywych wzbogalności do oceny właściwości fizykochemicznych koncentratów węgla kamiennych*. Przegląd Górniczy nr 7-8. Katowice 2009.

6. *Opracowanie metody prognozowania parametrów jakościowych odpadów powstających w wyniku grawitacyjnego wzbogacania energetycznego węgla kamiennego.* Praca statutowa IMBiGS Nr 14_70/411_01_01 Katowice 2010.

Preliminary Studies on the Possibility of Prediction of Quality Parameters of Waste Produced in the Process of Coals Enrichment

Abstract

Material debris excavated during operations carried out in coal mines must be subjected to enrichment processes. The accuracy of the enrichment (separation of feed into individual products) depends on many factors. Factors affecting the accuracy of the separation of feed into different products make the grain of a specific density goes to products other than established on the basis of laboratory tests. This phenomenon is called dispersion of grains. The greater degree of dispersion of the particles the lower the accuracy of enrichment. In the present study probable dispersion coefficient was used to determine the accuracy of the enrichment.

Prediction of the outcome of enrichment is a complex calculation issue. Assuming that the dispersion of particles has a normal distribution character it is possible to develop an appropriate mathematical model and computational computer program. In this study it was assumed that the dispersion of particles has a normal distribution character (Gaussian). It was also assumed that the waste products are isolated alternatively at densities of separation 2.0 g/cm^3 , 1.8 g/cm^3 , 1.6 g/cm^3 .

The calculations carried out show that the accuracy of the enrichment process has an important influence on the content of individual ingredients in the waste product. The accuracy of enrichment has also an influence on yield of waste products. The higher the density of separation outcomes of waste products decrease, at low densities of separation outcomes increase.

