

Wiesław BLASCHKE*, Katarzyna TARNAWSKA**

Wpływ dokładności wzbogacania w zakładach przerobczych na wyniki ekonomiczne kopalń węgla kamiennego

STRESZCZENIE. W pracy przeprowadzono analizę skutków ekonomicznych wzbogacania miałów węgla koksowych w osadzarkach. Na podstawie danych (krzywe wzbogalności) pochodzących z pięciu kopalń obliczono spodziewane rezultaty wzbogacania w warunkach przemysłowych. Wykorzystano dziewięć założonych teoretycznie współczynników dokładności rozdziału (rozproszenie prawdopodobne). Wyznaczono krzywe wzbogacania, a następnie wyliczono wychody koncentratów przy różnych wartościach rozproszenia prawdopodobnego zakładając, że koncentraty zawierać będą 9% popiołu. Im gorsza była dokładność rozdziału tym niższe były wychody, a więc zmniejszała się ilość produktu handlowego. Pokazano wielkości wpływów ze sprzedaży węgla zależnych od dokładności wzbogacania.

SŁOWA KLUCZOWE: węgiel kamienny, dokładność wzbogacania, efekty ekonomiczne

Wprowadzenie

Węgiel kamienny wydobywany na powierzchnię w wyniku eksploatacji pokładów składa się z różnej wielkości ziarn węgla oraz ziarn skały płonnej (kamienia, piasku pod-

* Prof. dr hab. inż. — Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice.

** Mgr inż. — Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Eugeniusz MOKRZYCKI

sadzkowego, łupków itd.). Urobek węglowy nie zawsze nadaje się do bezpośredniego wykorzystania przez użytkowników. Aby go sprzedać jako produkt handlowy, producent musi dostosować jego jakość do potrzeb konkretnych użytkowników. Dostosowanie to odbywa się w zakładach przerobczych i polega na usuwaniu nieużytecznych składników urobku. Procesy te nazywane są wzbogacaniem i prowadzi się je metodami grawitacyjnymi wykorzystując różnice pomiędzy gęstościami ziarn węgla i ziarn skały płonnej.

Węgłe kamienne energetyczne mogą być użytkowane (w większości przypadków) w postaci niewzbogaconej gdy tylko jego parametry jakościowe (zawartość popiołu, wartość opałowa) odpowiadają parametrom gwarancyjnym kotłów zainstalowanych u użytkowników. Mogą więc do produktów handlowych trafiać (i najczęściej trafiają) ziarna skały płonnej. Gdy ich zawartość w urobku będzie zbyt duża, produkt surowy musi być wzbogacony. Ważne jest aby średnia zawartość popiołu mieściła się w przewidywanym w umowach kupna/sprzedaży przedziale.

Inaczej sprawa wygląda w przypadkach przygotowywania produktów handlowych węgla koksowych. Tu do koncentratów nie mogą trafiać ziarna skały płonnej, gdyż w istotny sposób wpływają na późniejszą wytrzymałość koksu wytworzonego z zanieczyszczonych ziarnami kamienia mieszanek wsadowych. Z tego też względu, w wyniku badań, przyjęto, że zawartość popiołu w koncentraty węgla koksowych nie powinna przekraczać 9%. Takie ograniczenie gwarantuje, że w węglu wsadowym do procesu koksowania nie będzie ziarn czystej skały płonnej. Ograniczenie to pokazuje, że praktycznie wszystkie węgle koksowe muszą być wzbogacane.

Proces wzbogacania prowadzony jest dla grubszych ziarn w cieczach ciężkich, a dla ziarn drobnych (powyżej 0,5 mm) w osadarkach. Najdrobniejsze ziarna wzbogaca się flotacyjnie.

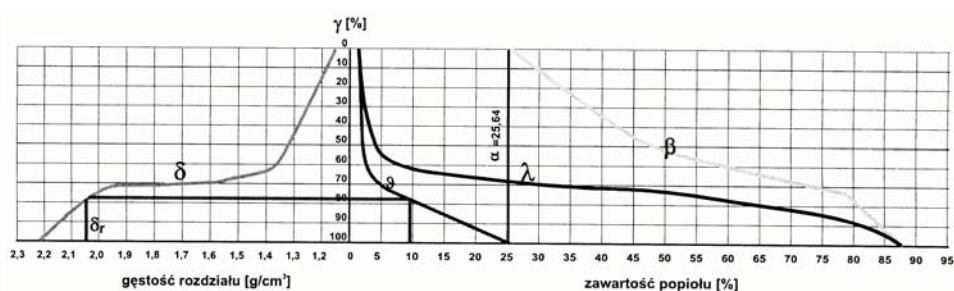
Przemysłowe wzbogacanie węgla przebiega w sposób niedokładny, co oznacza, że uzyskiwane rezultaty (parametry jakościowe, wychód) są gorsze niż spodziewalibyśmy się na podstawie analizy technologicznej węgla surowego. Analizy takie prowadzone są w laboratoriach i polegają na rozdzieleniu wąskich klas ziarnowych w cieczach ciężkich, a następnie oznaczanie w wydzielonych frakcjach interesujących nas parametrów jakościowych. Takie badania nazywane są określaniem wzbogalności węgla, a graficzne przedstawienie wyników nazywamy krzywymi wzbogalności.

Przemysłowe wzbogacanie węgla w cieczach ciężkich niewiele odbiega od wyników rozdzielania w laboratoriach. Natomiast wzbogacanie w osadarkach powoduje, że uzyskiwane wyniki czasami bardzo się różnią od wyników badań teoretycznych (laboratoryjnych). Z tego też względu, wszędzie tam, gdzie jest to możliwe, preferuje się wzbogacanie w cieczach ciężkich. W praktyce wzbogacania mialów węglowych wykorzystuje się głównie osadarki. Osadarki w zależności od rozwiązań konstrukcyjnych i sposobu prowadzenia procesu rozdzielania charakteryzują się różną dokładnością wzbogacania.

W niniejszej pracy przeprowadzono analizę skutków ekonomicznych spowodowanych niedokładnością wzbogacania węgla w osadarkach. Obliczenia przeprowadzone zostały dla mialów węgla koksowego (klasa 20–0,5 mm).

1. Dane wyjściowe do przeprowadzenia analiz

Analizę wpływu dokładności wzbogacania na wyniki ekonomiczne zakładu górniczego postanowiono przeprowadzić dla węgla koksowych pochodzących z pięciu kopalń. Nazwano je A, D, P, S, W. Podstawą były analizy densymetryczne klas ziarnowych 20–0,5 mm. Na ich podstawie wykreślono krzywe wzbogalności. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowo jedną z tych krzywych (kopalnia W).



Rys. 1. Przykładowa krzywa wzbogalności miałów węgla koksowego (Węgiel z KWK „W”)

Fig. 1. Washability curve of coking coal fines – an example (Coal from coal mine “W”)

Krzywe wzbogalności pozwalają określić trudność wzbogacania węgla oraz ustalić parametry rozdziału węgla na koncentrat i odpady przy założeniu albo gęstości rozdziału albo pożądanej zawartości popiołu w koncentracie. Są to oczywiście dane teoretyczne zakładające, że proces rozdziału odbywać się będzie w idealnych warunkach.

Przyjmując, że zawartość popiołu w koncentracie powinna wynosić 9% odczytano z krzywych teoretyczny wychód koncentratu. Wychód koncentratu ma bowiem istotne znaczenie, gdyż określa ilość produktu handlowego możliwą do uzyskania z jednej tony węgla surowego. Dla badanych węgli teoretyczny wychód koncentratu o zawartości 9% popiołu otrzymywanego z węgla surowego (różne zawartości popiołu) wyniósł:

Kopalnia	A	D	P	S	W
Wychód koncentratu [%]	74,5	62,9	77,2	59,0	76,9
Zawartość popiołu w węglu surowym [%]	22,27	32,46	23,43	34,94	25,64

Badane węgle wzbogacane są w osadzkach miałowych. Osadzarki pracują z różną dokładnością rozdziału. Dokładność tę określa się przy pomocy wskaźników rozproszenia prawdopodobnego lub imperfekcji. W niniejszej pracy do dalszych analiz przyjęto wskaźnik rozproszenia prawdopodobnego. Wybór podyktowany był tym, że autorzy mogli posługiwać się programem (opracowanym przez dr inż. Zbigniewa Grudzińskiego z PAN Kraków) umożliwiającym przeliczenie krzywych wzbogalności na krzywe wzbogacania przy kolejnym zakładaniu wielkości wskaźnika rozproszenia prawdopodobnego.

Do obliczeń przyjęto rozproszenie prawdopodobne w wysokości: $E_p = 0,08; 0,10; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24$.

Wartości rozproszenia prawdopodobnego dla przemysłowych osadzarek wahają się (w zależności od konstrukcji) w przedziale od $Ep = 0,07$ do $Ep = 0,25$. Wartości rozproszenia prawdopodobnego są podawane przez producentów osadzarek jako parametry gwarancyjne. Są one sprawdzalne w praktyce pod warunkiem, że osadzarka pracuje w warunkach technicznych i technologicznych określonych przez producentów [1, 2].

W warunkach przemysłowych (ruchowych) osadzarki często pracują mniej dokładnie. Powodem mogą być inne czynniki (poza różnicami gęstości) takie jak: obciążenie maszyny – przeciążenia lub niedociążenia, czas przebywania materiału w osadzarce, uszkodzenia konstrukcji maszyn, niedokładność obsługi, przebudowa osadzarki w trakcie prac remontowych itp.

Ponieważ niniejsza praca nie jest oceną dokładności wzbogacania lecz wpływem tej dokładności na efekty ekonomiczne nie analizowano skutków pracy konkretnych maszyn. Założono, że dokładności te będą wahać się (założenie umowne) od $Ep = 0,08$ do $Ep = 0,24$.

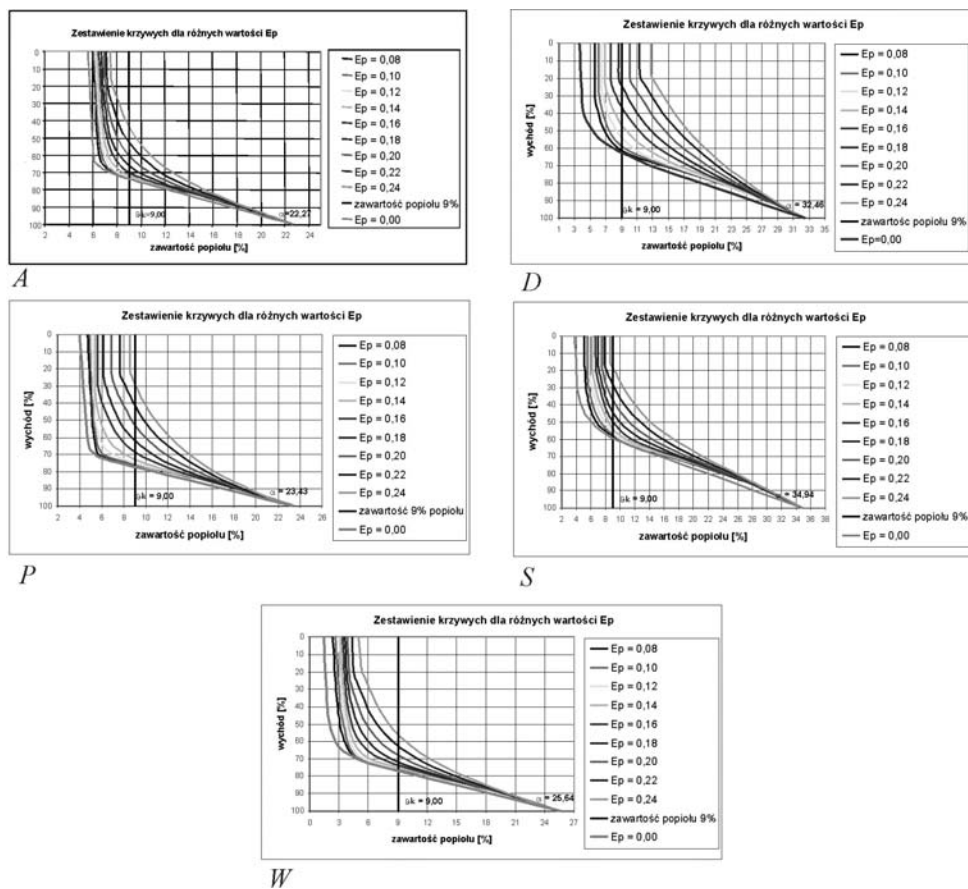
Ocenę efektów ekonomicznych przeprowadzono na podstawie wskaźnika wartości produkcji [3]. Wartość produkcji to iloczyn ilości koncentratu otrzymanego z jednej tony węgla surowego (wychód koncentratu) i jego ceny zbytu. Wychody koncentratów podano w dalszej części niniejszej publikacji natomiast przyjęto, że cena produktu handlowego o zawartości 9% popiołu wynosi dla węgla typu 34 – 225 zł/Mg, a dla węgla typu 35 – 360 zł/Mg.

2. Krzywe wzbogacania dla różnych wskaźników dokładności rozdziału węgla

Znając wskaźniki rozproszenia prawdopodobnego (dokładność rozdziału) można przeliczyć krzywe wzbogalności na krzywe wzbogacania. Przeliczenia te służą prognozowaniu wyników wzbogacania w warunkach przemysłowych na podstawie informacji o węglu surowym kierowanym do wzbogacania oraz na podstawie wskaźnika rozproszenia prawdopodobnego osadzarki, na której prowadzony będzie ten proces. Przeliczenia te opracowane zostały na podstawie prac Trompa i Terry [1, 2]. Metoda prowadzenia przeliczeń zapisana jest w skrypcie W. Stępińskiego [1], a Z. Grudziński opracował komputerowy program tych obliczeń.

W pracy [4] przeprowadzono obliczenia współrzędnych krzywych wzbogacania wykorzystując program komputerowy Z. Grudzińskiego. Obliczenia wykonano dla węgla z pięciu kopalń zakładając kolejne wartości rozproszenia prawdopodobnego. Wyniki obliczeń zestawiono w tabelach (45 tablic – 5 kopalń x 9 wartości Ep), których w niniejszej pracy nie zamieszczono.

Obliczone współrzędne krzywych wzbogacania koncentratu (tzw. krzywe ϑ) przedstawiono w formie graficznej. Dla każdej kopalni jest to pęk krzywych wychodzących z punktu podającego zawartość popiołu w węglu surowym (α). Krzywe te dla kolejnych kopalń zestawiono na rysunku 2. Na wykresach zamieszczono także krzywą wzbogalności koncentratu. Pokazuje ona jak różnią się krzywe wzbogacania koncentratu uzyskiwane przy różnych współczynnikach Ep . Krzywa wzbogalności znajduje się z lewej strony pęku krzywych. Zaznaczono ją jako krzywą dla $Ep = 0,00$.



Rys. 2. Krzywe wzbogacania dla koncentratów uzyskiwanych przy różnych wartościach rozproszenia prawdopodobnego. Dla $E_p = 0,00$ krzywa wzbogacalności (Węgle z kopalń A, D, P, S, W)

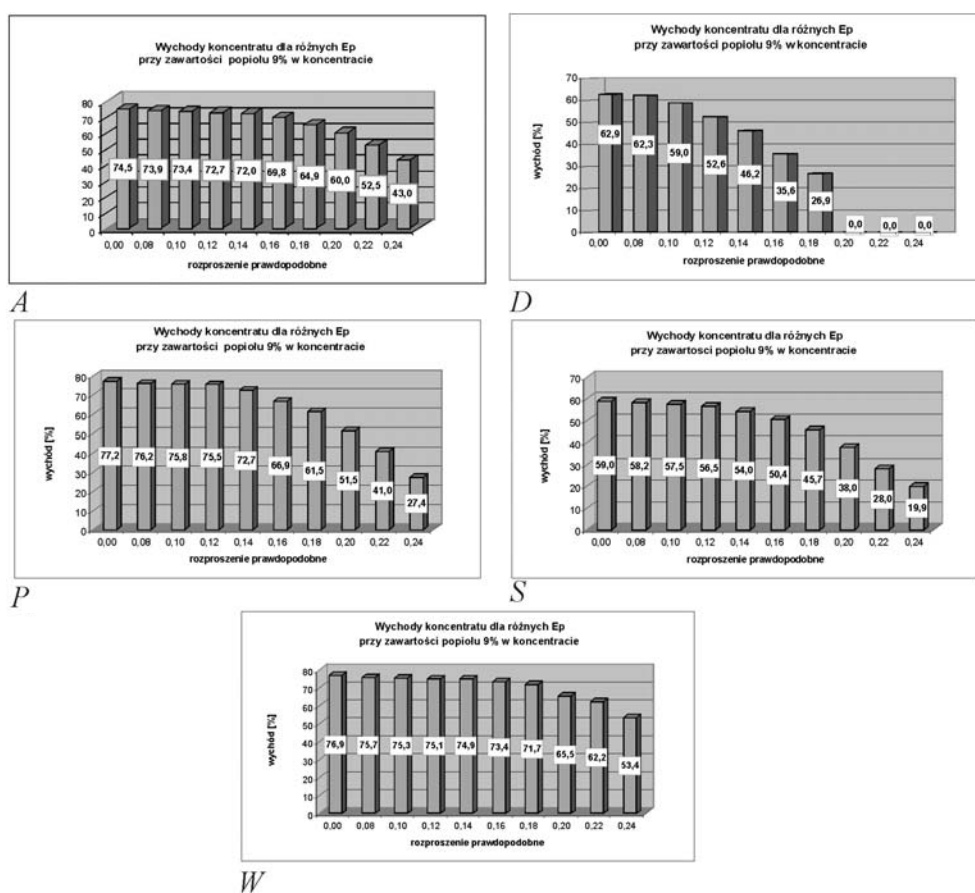
Fig. 2. Performance curves for concentrates produced at different values of probable error (when $E_p = 0,00$ – washability curve)

Na wykresach (rys. 2) wykreślono proste pionowe dla zawartości popiołu równej 9%. Proste te, przecinając się z krzywymi ϑ , pokazują nam jaki osiągniemy wychód koncentratu przy różnych dokładnościach pracy osadzarki.

3. Wychody koncentratów uzyskiwane przy różnej dokładności wzbogacania

Jak już uprzednio wspomniano spodziewane rezultaty wzbogacania węgla osiągnane przy wzbogacaniu w osadzarkach pracujących z różną dokładnością opisywane są krzywymi

wzbogacania koncentratu (krzywymi 9). Łatwo zauważyć na wykresach (rys. 2), że im mniejsza dokładność wzbogacania tym mniejszy wychód koncentratu. Dla specjalistów przeróbki węgla jest to oczywiste, natomiast problem ten jest rzadko uświadamiany dla kierownictw zakładów górniczych. Aby przybliżyć ten problem na roboczych wykresach pęków krzywych wzbogacania odczytano wychody koncentratów uzyskiwane dla różnych dokładności wzbogacania. Odczyty wykonano rzutując punkt przecięcia prostej pionowej wykreślonej dla zawartości popiołu 9% z kolejnymi krzywymi wzbogacania koncentratu. Odczytane wartości pokazano, dla kolejnych wartości rozprośnień prawdopodobnych E_p , na rysunku 3 w postaci wykresów słupkowych.



Rys. 3. Wychody koncentratów osiągnięte przy różnych wartościach rozproszenia prawdopodobnego. Dla $E_p = 0,00$ teoretyczny wychód koncentratu (Węgla z kopalń A, D, P, S, W)

Fig. 3. Concentrate yield at different values of probable error. When $E_p = 0,00$ – theoretical concentrate yield (Coals from coal mines: A, D, P, S, W)

Słupki dla $E_p = 0,00$ pokazują wychód teoretyczny, który byłby osiągnięty przy idealnym wzbogacaniu. W tym przypadku jest to rozdział w warunkach laboratoryjnych w cieczach ciężkich. W praktyce wzbogacania w osadzarkach rezultat taki jest niemożliwy do osiągnięcia.

Większość krajowych osadzarek pracuje, w warunkach przemysłowych, z dokładnością około $E_p = 0,18$. Są to informacje uzyskane z, nielicznych niestety, badań pracy maszyn zainstalowanych w zakładach przeróbki węgla. Tu trzeba dodać, że w wielu przypadkach gwarantowane przez producentów wskaźniki dokładności E_p mają niższą wartość, a więc osadzarki powinny pracować dokładniej.

W warunkach ruchowych zakładów przerobczych węgla kamiennego bardzo rzadko (lub wcale) prowadzi się badania kontrolne dokładności wzbogacania posiadanych osadzarek. Nie jest to dobra praktyka, gdyż brak jest podstaw do doskonalenia pracy osadzarki lub do podjęcia decyzji o konieczności jej wymiany.

Wychód koncentratu jest czymś w rodzaju wskaźnika uzysku produktu handlowego osiąganego przy wzbogacaniu będącego do dyspozycji węgla surowego. Im niższy wychód tym większe straty substancji węglowej w odpadach (lub w produktach pośrednich). Ale najbardziej istotne jest to, że zmniejsza się ilość produktu handlowego. A to rzutuje w istotny sposób na ekonomikę nie tylko zakładu przerobczego ale całego zakładu górniczego.

Analizując pokazane na rysunku 3 wykresy słupkowe łatwo określić jakie będą wpływy ze sprzedaży węgla gdy spadać będzie dokładność wzbogacania. W skrajnym przypadku (kopalnia D) pogorszenie dokładności wzbogacania powyżej $E_p = 0,18$ skutkuje niemożliwością uzyskania koncentratu o 9% zawartości popiołu. Jest to hipotetyczny przypadek ale gdyby wystąpił w praktyce ruchowej to produkowane koncentraty musiałyby zawierać powyżej 9% popiołu co może spowodować trudności w jego sprzedaży.

Zmniejszanie się wychodów koncentratów wraz z pogorszeniem się dokładności wzbogacania zależy też od charakterystyki technologicznej węgla (kształtu krzywych wzbogalności). W pracy przytoczono analizy dla węgla z pięciu kopalń. Na wykresach słupkowych widać, że zmniejszanie się wychodów koncentratów następuje w różnym stopniu dla węgla z różnych kopalń. Spadek ten jest najmniejszy dla węgla z kopalni W. W innych kopalniach jest większy (aż do wspomnianego skrajnego przypadku kopalni D). Porównanie wykresów słupkowych pokazuje, że analizy takie powinny być wykonywane indywidualnie dla każdego przypadku wzbogacania węgla w osadzarkach. Posiadając takie analizy łatwo będzie można wyciągnąć wnioski zarówno co do pracy poszczególnych osadzarek jak i co do skutków ekonomicznych.

4. Efekty ekonomiczne niedokładności wzbogacania węgla

Skutki ekonomiczne dokładności wzbogacania węgla najłatwiej pokazać na przykładzie zmian wartości produkcji, osiąganey przy różnych wartościach rozproszenia prawdopodobnego. Jak już uprzednio wspomniano wartość produkcji to iloczyn wychodu i ceny węgla. Wychody odczytano z danych pokazanych na rysunku 3. Ceny węgla przyjęto w wysokości: typ 34 – 225 zł/Mg; typ 35 – 360 zł/Mg. Wielkości te są umowne, ale przy innych cenach łatwo przeprowadzić podobne obliczenia.

Niniejsza praca nie jest analizą wykonaną dla konkretnych pracujących w zakładach przerobczych osadzarek lecz tylko próbą pokazania skutków ekonomicznych dla hipotetycznych dokładności (wartości Ep). Z tego też względu założono umownie, że krzywe wzbogacalności raz dotyczą węgla typu 34, a drugi raz węgla typu 35. Ze względu na duże różnice cen pomiędzy typami węgla łatwo pokazać skalę strat na sprzedaży węgla niedokładnie wzbogaconego.

Przeprowadzone obliczenia zestawiono w tabelach 1 i 2.

TABELA 1. Skutki ekonomiczne niedokładności wzbogacania węgla typu 34. Cena węgla 225 zł/Mg

TABLE 1. Economic effect of inaccuracy of coking coal type 34 beneficiation. Coal price 225 PLN/Mg

Dokładność wzbogacania Ep	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24
Kopalnia A	166,27	165,15	163,58	162,00	157,05	146,03	135,00	118,13	96,75
Kopalnia D	140,18	132,75	118,35	103,95	80,14	60,53	0,00	0,00	0,00
Kopalnia P	174,45	170,55	169,88	163,58	150,53	138,38	115,88	92,25	61,65
Kopalnia S	130,95	129,38	127,13	121,50	113,40	102,83	85,50	63,00	44,78
Kopalnia W	170,33	169,43	168,98	168,53	165,15	161,33	147,60	139,95	120,15

TABELA 2. Skutki ekonomiczne niedokładności wzbogacania węgla typu 35. Cena węgla 360 zł/Mg

TABLE 2. Economic effect of inaccuracy of coking coal type 35 beneficiation. Coal price 360 PLN/Mg

Dokładność wzbogacania Ep	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24
Kopalnia A	266,04	264,24	261,72	259,20	251,28	233,64	216,00	189,00	154,80
Kopalnia D	224,28	212,40	189,36	166,32	128,16	96,84	0,00	0,00	0,00
Kopalnia P	274,32	272,88	271,80	261,72	240,84	221,40	185,40	147,60	98,64
Kopalnia S	209,52	207,00	203,40	194,40	181,44	164,52	136,80	100,80	71,74
Kopalnia W	272,53	271,08	270,36	269,64	264,24	258,12	235,80	223,92	192,24

Analizując dane zamieszczone w tabelach 1 i 2 łatwo zauważyć jak duże są skutki ekonomiczne dokładności wzbogacania węgla w osadzarkach. Wpływy ze sprzedaży koncentratu uzyskanego z jednej tony węgla surowego wzbogaconego w najdokładniej pracujących osadzarkach $Ep = 0,08$ w stosunku do najgorzej pracujących osadzarek $Ep = 0,24$ spadają od 50 zł/Mg do 110 zł/Mg w zależności od kopalni wzbogacających węgiel typu 34. Dla węgla typu 35 wpływy ze sprzedaży (w tych samych przedziałach Ep) zmniejszyły się mogą od 80 zł/Mg do 175 zł/Mg.

Interesujące jest porównanie strat na sprzedaży węgla przy niedokładnym wzbogacaniu (przy różniących się E_p tylko o 0,02). Z tabel odczytuje się, że straty wahają się od kilku do nawet kilkudziesięciu złotych.

Przeprowadzona analiza pokazuje jak ważny jest dobór osadzarki, a właściwie dokładność jej pracy, do posiadanego węgla, charakteryzowanego krzywą wzbogalności. Wybór niedokładnie pracujących osadzarek może spowodować ogromne straty przy sprzedaży węgla handlowego. Może okazać się, że warto kupić droższe ale za to dokładnie wzbogacające osadzarki, gdyż dodatkowe wpływy ze sprzedaży węgla pokryją różnice w kosztach zakupu takiej osadzarki.

Przeprowadzona analiza pokazała także jak ważnym jest prawidłowe prowadzenie procesu wzbogacania w posiadanych już osadzarkach. Trzeba bezwzględnie prowadzić proces rozdziału tak aby uzyskiwać gwarantowane przez producenta rozproszenie prawdopodobne. Złe, niedokładne prowadzenie procesu wzbogacania skutkuje zmniejszeniem wychodu koncentratu a więc dużymi stratami przy sprzedaży węgla handlowego.

Wnioski

1. Dokładność wzbogacania węgla ma istotny wpływ na ekonomikę zakładów górniczych.
2. Przy projektowaniu zakładów przerobczych należy przewidywać możliwość zainstalowania osadzarek o niskiej wartości rozproszenia prawdopodobnego, a więc osadzarek pracujących możliwie najdokładniej.
3. Podczas prowadzenia procesu wzbogacania w istniejących maszynach należy ściśle przestrzegać warunków jego prowadzenia, tak aby rzeczywiste rozproszenie prawdopodobne było jak najbardziej zbliżone do gwarantowanego przez producenta rozproszenia.
4. Skutki niedokładnego wzbogacania węgla mogą przynosić kopalni straty rzędu nawet wielu milionów złotych co ma istotny wpływ na rentowność zakładu górniczego.
5. Zaleca się, w świetle prezentowanej analizy, przeprowadzenie badań dokładności wzbogacania posiadanych osadzarek i zbadanie możliwości ewentualnej poprawy rezultatów prowadzonego procesu.

Literatura

- [1] STĘPIŃSKI W., 1964 — Wzbogacanie grawitacyjne. PWN, Łódź–Warszawa–Kraków.
- [2] NAWROCKI J., 1976 — Analityczno-graficzne metody oceny pracy wzbogalników grawitacyjnych. Śląsk, Katowice.
- [3] BLASCHKE W., 1970 — Ekonomiczna sprawność wzbogacania węgla energetycznego. Przegląd Górniczy t. XXVI, nr 7–8.

- [4] TARNAWSKA K., 2007 — Wpływ dokładności rozdziału na ustalanie najkorzystniejszych gęstości rozdziału przy wzbogacaniu węgla koksowego. Praca dyplomowa, Katedra Przeróbki Kopalni Stałych i Utylizacji Odpadów, Wydz. Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska.

Wiesław BLASCHKE, Katarzyna TARNAWSKA

Impact of accuracy of coal beneficiation in preparation plants on coal mines' economic results

Abstract

Economic results of beneficiation of coking coal fines in jigs have been analysed in the paper. Basing on data (washability curves) from five coal mines, the expected effects of beneficiation process in industrial conditions have been calculated. In calculation, nine theoretically assumed coefficients of separation accuracy (probable errors) have been applied. Washability curves and concentrate's yield at different probable error levels have been determined, assuming that concentrates content 9% of ash. The worse accuracy of separation, the lower yield was, and therefore – the lower volume of commercial product. Sale on returns depending on accuracy of coal beneficiation has been shown.

KEY WORDS: hard coal, accuracy of coal beneficiation, economic effects