

## Badanie podatności węgla kamiennych na proces rozdziału metodą suchej separacji\*

### 1. Wprowadzenie

Od kilku lat mokre technologie wzbogacania węgla kamiennego zostają zastępowane procesami suchej separacji skały płonnej z urobku węglowego. Proces ten umożliwiła nowa konstrukcja powietrznego stołu koncentracyjnego. Podstawy rozdziału są znane od około stu lat. Niemniej jednak wzbogacanie tą metodą zostało zastąpione mokrymi sposobami oddzielania ziaren węglowych od skały płonnej (ziaren kamienia, łupków, piritów itp.). Mokre metody są dużo dokładniejsze od metod suchych, pozwalając uzyskiwać czyste koncentraty węglowe przy dużych uzyskach. Metody te są jednak kosztowne i wymagają wprowadzenia mniej lub bardziej złożonych układów gospodarki wodno-mułowej. Wysokie koszty wzbogacania węgla metodami mokrymi (ciecze ciężkie, osadzarki, flotacja, wzbogacalniki strumieniowe itp.) skutkują koniecznością ich uwzględniania w cenach węgla. W wielu przypadkach koszty pozyskania produktów finalnych przekraczają możliwe do osiągnięcia, w warunkach rynkowych, ceny węgla. Z tego też powodu poszukuje się tańszych rozwiązań. Jednym z nich jest wprowadzenie suchej separacji węgla, która pozwala na odkamienienie urobku węglowego. W zależności od właściwości technologicznych urobku, opisanych krzywymi wzbogalności, można uzyskiwać czyste koncentraty kamienia wykorzystywane jako kruszywo. W wielu przypadkach udaje się otrzymywać produkty węglowe, które spełniają wymogi użytkowników [4].

Projektowanie układów technologicznych przeróbki węgla odbywa się na podstawie laboratoryjnych badań składu ziarnowego i składu gęstościowego. Określa się tzw. trudność wzbogacania (podatność na rozdział) przy założonych gęstościach rozdziału.

Podczas suchej separacji węgla dobranie reżimu technologicznego odbywa się metodą prób i błędów. Producenci stołów powietrznych oferują swe usługi w zakresie uregulowania pracy urządzenia. Taka regulacja, wg informacji producentów, trwa od dwóch do czterech tygodni. Świadczy to, że optymalizacja procesu separacji jest bardzo trudna. Nie bada się podatności oddzielania kamienia gdyż proces ten odbywa się przy dużych gęstościach, a w praktyce nie stosuje się w badaniach laboratoryjnych gęstości cieczy ciężkiej powyżej  $2,0 \text{ g/cm}^3$ .

W niniejszym artykule podjęto próbę zbadania podatności urobku węglowego na separację przy dużych gęstościach rozdziału. Pamiętać należy, że proces rozdziału odbywa się w warstwie sfluidyzowanej, gdzie rzeczywista gęstość jest wypadkową wielu parametrów technicznych i technologicznych.

### 2. Sposoby oceny trudności wzbogacania grawitacyjnego

Wzbogacanie grawitacyjne polega na rozdziale składników nadawy wykorzystując różnice gęstości poszczególnych ziaren wchodzących w jej skład. Rozdział ten może przebiegać w łatwiejszy lub trudniejszy sposób. Jak wykazują, prowadzone od dziesiątków lat badania, trudność rozdziału ziaren wg gęstości zależy przede wszystkim od ilości ziaren skupionych wokół przyjętej gęstości rozdziału, wg której wydziela się poszczególne produkty (koncentrat, produkt pośredni, odpady). Procesy rozdziału grawitacyjnego nie są idealnie dokładne. Na skutek tej niedokładności do poszczególnych produktów trafiają ziarna, które powinny trafić do innych wydzielanych frakcji gęstościowych. Zjawisko to jest powszechnie znane. Opracowano szereg metod badania dokładności rozdziału (np. wskaźnik rozproszenia prawdopodobnego, imperfekcja, trójkąt błędów).

Projektując układy technologiczne wzbogacania węgla przeprowadza się analizy mające na celu pokazanie przy jakiej gęstości rozdziału urobek węglowy najłatwiej (przy jak najmniejszych zanieczyszczeniach niewłaściwymi ziarnami) rozdzielić na żądane produkty. Analizy takie prowadzi się przy wykorzystaniu krzywych wzbogalności wyznaczanych w warunkach laboratoryjnych poprzez rozdział urobku węglowego na poszczególne frakcje gęstościowe (w przedziałach  $1,3 - 2,0 \text{ g/cm}^3$  – najczęściej różnicując frakcje co  $0,1 \text{ g/cm}^3$ ). Kształt podstawowej krzywej wzbogalności (nazywanej  $\lambda$ ) obrazuje nam ilości (procentowe) poszczególnych wydzielanych frakcji w nadawie. Im krzywa jest bardziej wklęsła tym bardziej różnią się gęstościami ziarna węgla tworzące taką charakterystykę. Tym łatwiej będzie się rozdzielał urobek na poszczególne produkty (oczywiście w zakresie gęstości odpowiadającej wklęsłej części krzywej  $\lambda$ ). Badania trudności wzbogacania na podstawie krzywych wzbogalności jest bardzo szczegółowo opisane w krajowej literaturze i nie ma potrzeby powtarzania tych informacji [1, 6].

Trudność/łatwość wzbogacania ocenia się także za pomocą różnych metod. Przypomnieć można metody: Toporkowa, Fomina, Fomienki, Ulickiego, Panczenki, Czernienki i innych [2, 5]. Wymienione metody zakładają zalecane zawartości popiołu w koncentracie (przeważnie dla węgla koksowego) i oceniają trudność wzbogacania dla tak przyjętych, z góry założonych parametrów koncentratu.

Opracowano kilka metod opartych na wychodach frakcji gęstościowych badanego węgla. Wymienić tu należy metodę Birda, WUCHIN, RWPG, CERCHAR [2]. W metodzie Birda analizuje się ilości frakcji

\* Artykuł był opublikowany w Polityce Energetycznej. Tom 17. Zeszyt 4. Wyd. Instytutu GSMiE PAN. 2014

o gęstości  $\pm 0,1$  od przyjętej gęstości rozdziału. W metodzie WUCHIN zakłada się z góry, że koncentrat to frakcje poniżej  $1,4 \text{ g/cm}^3$ , a frakcje powyżej  $1,8 \text{ g/cm}^3$  są odpadami. Podobne założenie przyjmuje metoda Komisji Węglowej RWPG. Natomiast w metodzie CHERCHAR wyznacza się tangens kąta nachylenia krzywej gęstości  $\delta$  w punkcie, w którym przyjęta będzie gęstość rozdziału węgla na poszczególne produkty. Dla metod tych opracowano tablice skali trudności wzbogacania.

Analizując przydatność wymienionych powyżej metod łatwo zauważyć, że (poza metodą Birda i CHERCHAR) są one nieprzydatne do oceny podatności wzbogacania (odkamieniania) urobku węglowego metodą suchej separacji. Jak już wspomniano odkamienianie urobku odbywa się przy gęstościach powyżej  $2,0 \text{ g/cm}^3$ . Dla takich gęstości nie prowadzono dotychczas analiz trudności/łatwości wzbogacania.

Dla oceny podatności na wzbogacanie metodą suchej separacji można przystosować metodę Birda. Będzie to przedmiotem następnego rozdziału. Teoretycznie można by próbować wykorzystywać metodę CHERCHAR. Jednak wyznaczenie tangensa kąta nachylenia krzywej gęstości w punktach gdy gęstość przekracza  $2,0 \text{ g/cm}^3$ , a równocześnie brak jest wyników rozdziału urobku na frakcje powyżej tej gęstości jest dyskusyjne. Można by aproksymować krzywą gęstości poza zakres gęstości  $2,0 \text{ g/cm}^3$  ale już wyznaczanie tangensa kąta nachylenia tej części krzywej może być mało przydatne. Aproksymacja krzywej gęstości zostanie jednak wykorzystana przy pewnej modyfikacji metody Birda.

### 3. Wykorzystanie metody Birda do oceny podatności urobku do procesu rozdziału metodą suchej separacji

Łatwość lub trudność wzbogacania zależy od ilości ziaren znajdujących się w pobliżu planowanej gęstości rozdziału urobku na poszczególne produkty. Wspomniano o tym w poprzednim rozdziale. Bird przyjął, że dotyczyć to będzie ziaren o gęstości  $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  od przyjętej gęstości rozdziału. Na podstawie laboratoryjnego rozdziału w cieczach ciężkich (analiza densymetryczna) wyznacza się wychody produktów w kolejno wydzielanych frakcjach. Przyjmuje się w praktyce gęstości od  $1,3 \text{ g/cm}^3$  do  $2,0 \text{ g/cm}^3$ . Wyższych gęstości, ze względu na lepkość, praktycznie nie przygotowuje się. Jak łatwo zauważyć będzie to komplikować wyznaczenie wskaźnika Birda dla gęstości rozdziału powyżej  $2,0 \text{ g/cm}^3$ .

Bird opracował swą metodę do oceny trudności wzbogacania podczas wydzielania koncentratów węglowych. Założył, że ziarna o gęstości większej niż  $2,0 \text{ g/cm}^3$  są ziazami czystego kamienia, który łatwo można usunąć w procesach wzbogacania grawitacyjnego. Ponieważ Bird opracował skalę trudności wzbogacania, wg której można porównywać różne węgle, koniecznością stało się wyeliminowanie z rachunków udziałów ziaren czystego kamienia. Wzrost ilości czystego kamienia zmniejszył bowiem (procentowe) wychody pozostałych analizowanych frakcji (liczone do większej masy nadawy). Stąd Bird zaproponował swój wzór w postaci:

$$S_{\pm 01} = 100 (\gamma_{\delta+01} - \gamma_{\delta-0,1}) / \gamma_{\delta=2,0}$$

Podczas oceny podatności na wzbogacanie metodą suchej separacji wzór Birda w tej postaci nie jest przydatny. Rozdział, jak już o tym wspomniano, na produkty odbywa się właśnie w strefie odpadów (wewnątrz frakcji  $\gamma=2,0 - \gamma=\max \text{ g/cm}^3$ ). Nie ma jednak żadnej przeszkody aby uprościć wzór Birda do postaci:

$$S_{\pm 01} = (\gamma_{\delta+01} - \gamma_{\delta-0,1})$$

Interesuje nas wszak ilość ziaren znajdujących się w strefie odpadów. Można też umownie przyjąć skalę trudności wzbogacania Birda. Gdy wartość  $S_{\pm 01}$  jest mniejsza niż 7, stopień wzbogalności jest łatwy i nadają się wszystkie metody wzbogacania. Gdy wskaźnik jest w przedziale 7-10, stopień wzbogalności jest średni i muszą być stosowane wzbogalniki o wysokiej sprawności technologicznej.

Na przykładzie trzech klas ziarnowych urobku węglowego w następnym rozdziale oceniona będzie przydatność tych klas na rozdział metodą suchej separacji.

### 4. Badanie podatności urobku na proces suchej separacji

Badania podatności przeprowadzono na trzech klasach ziarnowych węgla koksowego. Dane zaczerpnięto z pracy [3]. Analizowano klasy ziarnowe 50 – 25 mm, 25 – 6 mm i 25 – 1 mm. Były to klasy ziarnowe przygotowane do separacji na powietrznym stole koncentracyjnym.

Próby węgla rozdzielono na frakcje:  $<1,3$ ; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0;  $>2,0 \text{ g/cm}^3$ , a następnie obliczono wychody poszczególnych frakcji. Wyniki rozdziału węgla surowego zestawiono w tab. 1.

Wykorzystując dane: gęstość rozdziału i wychód (sumaryczny) produktu o tej gęstości wykreślono krzywe gęstości rozdziału:

rys. 1. dla klasy ziarnowej 50 – 25 mm,

rys. 2 dla klasy ziarnowej 25 – 6 mm,

rys. 3. dla klasy ziarnowej 25 – 1 mm.

Ponieważ dane z laboratoryjnego rozdziału w cieczach ciężkich zakończyły się na gęstości  $2,0 \text{ g/cm}^3$  dalszy teoretyczny przebieg krzywej gęstości aproksymowano funkcjami. Funkcje te podano na kolejnych rysunkach. Z wykresów odczytano brakujące wychody frakcji, które nie były wydzielone laboratoryjnie. Dane rzeczywiste oraz dane odczytane zestawiono w tabelach:

tab. 2 dla klasy ziarnowej 50 – 25 mm,

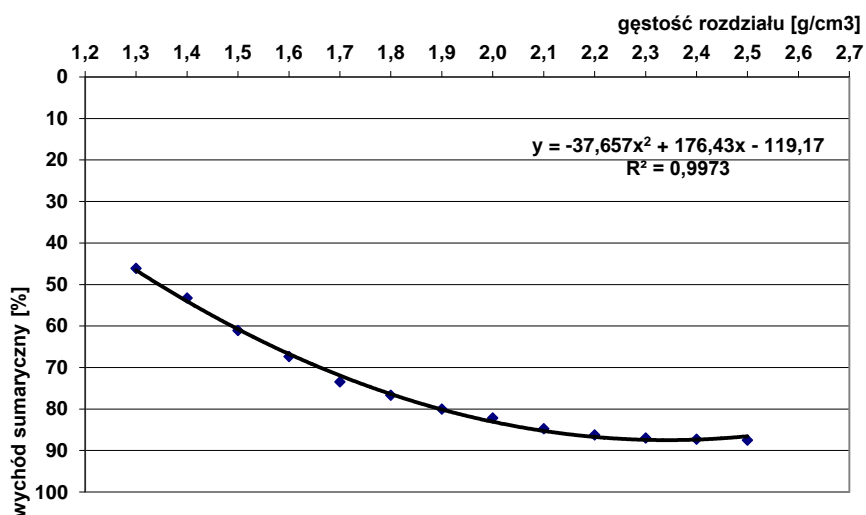
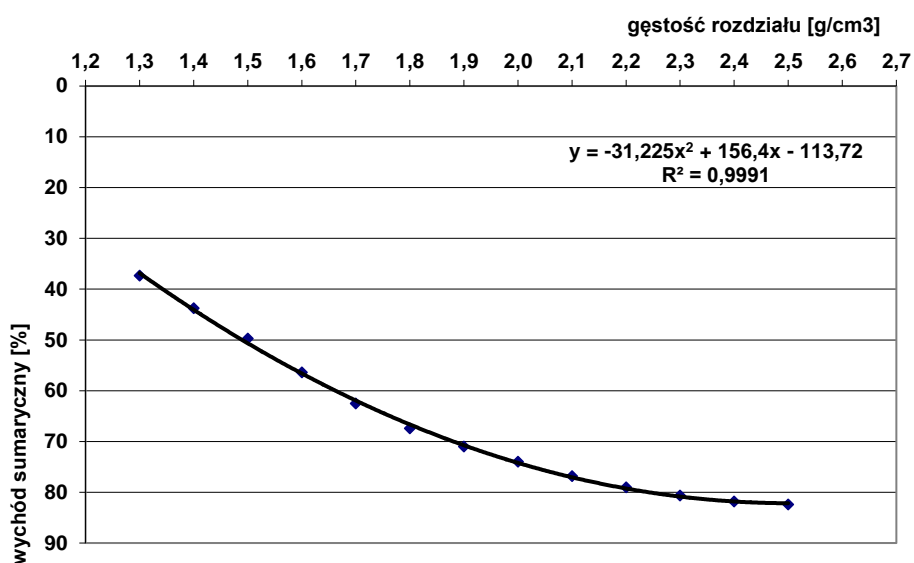
tab. 3 dla klasy ziarnowej 25 – 6 mm,

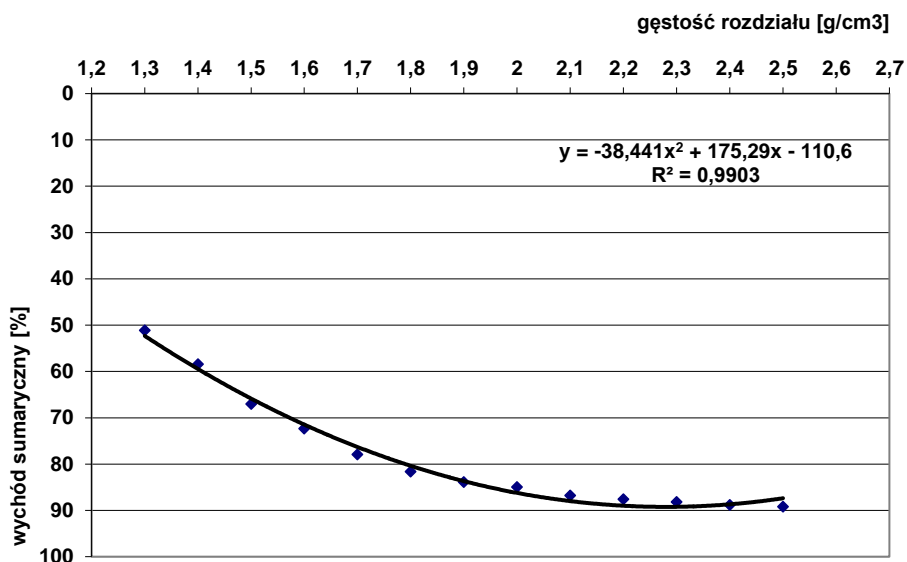
tab. 4 dla klasy ziarnowej 25 – 1 mm.

W tabelach zaznaczono kursywą wielkości odczytane z aproksymowanych części krzywych gęstości. Następnie obliczono wartości uproszczonego współczynnika Birda  $S_{\pm 01}$ . Obliczenia zostały wykonane dla możliwych gęstości rozdziału od 1,4 do  $2,4 \text{ g/cm}^3$ . Obliczenia te zamieszczono w ostatnich kolumnach tabel 2 – 4.

Tabela 1. Rozdział węgla surowego (nadawy) na frakcje gęstościowe

Lp.	Gęstość rozdziału [g/cm <sup>3</sup> ]	Frakcja gęstościowa [g/cm <sup>3</sup> ]	Klasa ziarnowa					
			50-25 mm		25-6 mm		25-1 mm	
			Wychód frakcji [%]	Wychód sumaryczny [%]	Wychód frakcji [%]	Wychód sumaryczny [%]	Wychód frakcji [%]	Wychód sumaryczny [%]
	1,30	<1,3	46,12	46,12	37,35	37,35	51,14	51,14
	1,40	1,30-1,40	7,11	53,23	6,41	43,76	7,30	58,44
	1,50	1,40-1,50	7,87	61,10	5,94	49,70	8,56	67,00
	1,60	1,50-1,60	6,28	67,38	6,70	56,40	5,36	72,36
	1,70	1,60-1,70	6,09	73,47	6,11	62,51	5,57	77,93
	1,80	1,70-1,80	3,18	76,65	4,88	67,39	3,69	81,62
	2,00	1,80-2,00	5,52	82,17	6,55	73,94	3,33	84,95
		>2,00	17,83	100,00	26,06	100,00	15,05	100,00
	Nadawa		100,00		100,00		100,00	

Rys. 1. Krzywe gęstości rozdziału klasy ziarnowej 50 –25 mm w laboratoryjnych cieczach ciężkich (powyżej gęstości 2,0 g/cm<sup>3</sup> aproksymacja krzywej)Rys. 2. Krzywe gęstości rozdziału klasy ziarnowej 25 – 6 mm w laboratoryjnych cieczach ciężkich (powyżej gęstości 2,0 g/cm<sup>3</sup> aproksymacja krzywej)



Rys. 3. Krzywe gęstości rozdziału klasy ziarnowej 25 – 1 mm w laboratoryjnych cieczach ciężkich (powyżej gęstości 2,0 g/cm<sup>3</sup> aproksymacja krzywej)

Tabela 2. Wyznaczanie współczynnika trudności wzbogacania, klasa ziarnowa 50 – 25 mm

Lp.	Gęstość rozdziału [g/cm <sup>3</sup> ]	Wychód sumaryczny [%]	Obliczenie współrzędnych krzywej trudności wzbogacania		
			Wartość $\gamma_{\sigma+0,1}$ [%]	Wartość $\gamma_{\sigma-0,1}$ [%]	Wartość współczynnika $S_{\pm 0,1}$
1.	1,3	46,12	—	—	—
2.	1,4	53,23	61,10	46,12	14,98
3.	1,5	61,10	67,38	53,23	14,15
4.	1,6	67,38	73,47	61,10	12,37
5.	1,7	73,47	76,65	67,38	9,27
6.	1,8	76,65	80,00	73,47	6,53
7.	1,9	80,00	82,17	76,65	5,52
8.	2,0	82,17	84,75	80,00	4,75
9.	2,1	84,75	86,25	82,17	4,08
10.	2,2	86,25	87,00	84,75	2,25
11.	2,3	87,00	87,25	86,25	1,00
12.	2,4	87,25	87,50	87,00	0,50
13.	2,5	87,50	—	87,25	—

Tabela 3. Wyznaczanie współczynnika trudności wzbogacania, klasa ziarnowa 50 – 6 mm

Lp.	Gęstość rozdziału [g/cm <sup>3</sup> ]	Wychód sumaryczny [%]	Obliczenie współrzędnych krzywej trudności wzbogacania		
			Wartość $\gamma_{\sigma+0,1}$ [%]	Wartość $\gamma_{\sigma-0,1}$ [%]	Wartość współczynnika $S_{\pm 0,1}$
1.	1,3	37,35	—	—	—
2.	1,4	43,76	49,70	37,35	12,35
3.	1,5	49,70	56,4	43,76	12,64
4.	1,6	56,40	62,51	49,70	12,84
5.	1,7	62,51	67,39	56,40	10,99
6.	1,8	67,39	71,00	62,51	8,49
7.	1,9	71,00	73,94	67,39	6,55
8.	2,0	73,94	76,80	71,00	5,80
9.	2,1	76,80	79,00	73,94	5,06
10.	2,2	79,00	80,60	76,80	3,80
11.	2,3	80,60	81,80	79,00	2,80
12.	2,4	81,80	82,40	80,60	1,80
13.	2,5	82,40	—	81,80	—

Tabela 4. Wyznaczanie współczynnika trudności wzbogacania, klasa ziarnowa 50 – 1 mm

Lp.	Gęstość rozdziału [g/cm <sup>3</sup> ]	Wychód sumaryczny [%]	Obliczenie współrzędnych krzywej trudności wzbogacania		
			Wartość $\gamma_{\sigma+0,1}$ [%]	Wartość $\gamma_{\sigma-0,1}$ [%]	Wartość współczynnika $S_{\pm 0,1}$
1.	1,3	51,14	—	—	—
2.	1,4	58,44	67,00	51,14	15,86
3.	1,5	67,00	72,36	58,44	13,92
4.	1,6	72,36	77,93	67,00	10,93
5.	1,7	77,93	81,62	72,36	9,26
6.	1,8	81,62	83,90	77,93	5,97
7.	1,9	83,90	84,95	81,62	3,33
8.	2,0	84,95	86,80	83,90	2,90
9.	2,1	86,80	87,60	84,95	2,65
10.	2,2	87,60	88,20	86,80	1,4
11.	2,3	88,20	88,80	87,60	1,2
12.	2,4	88,80	89,20	88,20	1,00
13.	2,5	89,20	—	88,80	—

Z obliczeń wynika, że współczynniki Birda dla kolejnych gęstości rozdziału powyżej 2,0 g/cm<sup>3</sup> kształtuje się następująco:

klasa ziarnowa 50 – 25 mm  $S_{\pm 0,1} = 4,75 - 0,50$ ,  
klasa ziarnowa 25 – 6 mm  $S_{\pm 0,1} = 5,80 - 1,80$ ,  
klasa ziarnowa 25 – 1 mm  $S_{\pm 0,1} = 2,90 - 1,00$ .

W rozdziale 3 przytoczono, za skalą trudności wzbogacania Birda, że wartość współczynnika Birda poniżej  $S_{\pm 7}$  cechuje węgle łatwo wzbogacane. Analizując wyniki obliczeń zestawionych w tabelach 2 – 4 należy stwierdzić, że podatność badanych węgli na proces suchego odkamieniania jest bardzo wysoka. Na tej podstawie łatwo wysunąć wniosek, że separacja na powietrznych stołach koncentracyjnych jest skuteczna dla łatwego usuwania kamienia z urobku węglowego.

## 5. Podsumowanie

1. Badania podatności węgla na proces suchego odkamieniania wymaga dokonania pewnej modyfikacji metody Birda polegającej na usunięciu ze wzoru mianownika, który określa ilość (wychód) ziaren czystego kamienia. Zabieg ten jest konieczny, gdyż właśnie w obrębie frakcji kamiennych następuje proces suchego odkamieniania.
2. Inne metody oceny trudności wzbogacania są nieprzydatne podczas analizy suchego odkamieniania gdyż określają gęstości rozdziału na koncentrat i odpady w przedziałach gęstości poniżej 1,8 g/cm<sup>3</sup>.
3. Przedstawiony sposób oceny podatności na stole koncentracyjnym odkamieniania urobku węglowego jest pierwszą próbą wykonania takiej analizy. Pracę wykonano na trzech próbach urobku

węgla koksowego. Konieczna była aproksymacja przebiegu krzywej gęstości w zakresie powyżej  $2,0 \text{ g/cm}^3$ . Autorzy zdają sobie sprawę, że jest to uproszczenie metody oceny.

4. Przeprowadzone badania i obliczenia wykazały, że urobek węglowy analizowanych prób jest łatwo wzbogacany w zakresie rozdziału powyżej  $2,0 \text{ g/cm}^3$ . Badania powyższe należy przeprowadzić także na innych węglach. Wartość wskaźnika Birda kształtuje się poniżej wartości  $S_{\pm 01} = 6$ . A więc dla badanych węgla proces suchego odkamieniania jest skuteczny.

### Literatura

1. Blaschke S.: Technologia i technika przeróbki mechanicznej kopalin użytecznych. Wyd. Górn.-Hutnicze. Katowice. 1955. Tom II str. 20 – 39.
2. Blaschke W.: Przeróbka węgla kamiennego – wzbogacanie grawitacyjne. Wyd. IGSMiE PAN. Kraków 2009. str. 71 – 80.
3. Blaschke W., Okarmus P., Ziomber S.: Skuteczność suchego odkamieniania węgla koksowego metodą separacji na powietrznych stołach koncentracyjnych. Monografia – Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Komeko 2014. Wyd. KOMAG . Gliwice. 2014. s. 81 – 91.
4. Czasopismo Techniczne. Artykuły przedrukowane z publikacji pracowników Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego. Zeszyt 154 – 161. 2013-2014. str. 3 – 47.
5. Pawłowicz W.I., Fomienko T.G., Pogarczewa E.M.: Opriedielenije pokazitatelej obogaszczenija uglej. Wyd. Niedra. Moskawa 1966.
6. Stępiński W.: Wzbogacanie grawitacyjne. Wyd. PWN. Warszawa 1964.

