

Edward JACHNIK

MODELOWANIE MATEMATYCZNE CHARAKTERYSTYK WZBOGACALNOŚCI WĘGLA
DLA CELÓW AUTOMATYCZNEGO STEROWANIA

Streszczenie. Wyznaczenie pełnych charakterystyk wzbogacalności węgla wymaga przeprowadzenia analiz w wielu cieczach o różnych gęstościach. Uproszczenie badań jest możliwe przez ograniczenie ilości cieczy. Różni autorzy prezentują pogląd, że możliwe jest odtworzenie charakterystyk wzbogacalności na podstawie badań przeprowadzonych tylko dla dwóch cieczy, a więc na podstawie danych dla dwóch gęstości rozdziału. W pracy zebrano prezentowane w literaturze polskiej i radzieckiej metody aproksymacji charakterystyk wzbogacalności. Podstawę tych met. są różne modele nadawy. Przedstawiono trzy znane modele nadawy. Zaproponowano nowy, czwarty model, oparty na krzywej separacji Halla.

Dla sprawdzenia dokładności przedstawionych modeli przeprowadzono szereg obliczeń, porównując uzyskane charakterystyki z wynikami pełnych analiz gęstościowych. Sprawdzono dokładność odtwarzania charakterystyk wzbogacalności dla węgla pochodzących z 34 polskich kopalń. Porównywano wartości wychodów frakcji gęstościowych i zawartości popiołu w tych frakcjach uzyskane z obliczeń z wartościami dokładnymi.

Obliczenia prowadzono dla celów automatycznego sterowania, modelowania i symulacji procesów wzbogacania. Wybrano najdokładniejszy i najbardziej odpowiedni, zdaniem autora, model, proponowany do tych celów.

1. WSTĘP

Znajomość aktualnych charakterystyk wzbogacalności węgla jest konieczna dla właściwego prowadzenia ruchu, jak i rozliczenia zakładu przerobczego. Krzywe wzbogacalności (w postaci charakterystyk gęstościowych) wykorzystuje się również dla celów automatycznego sterowania, modelowania i symulacji procesów wzbogacania. Wyznaczenie charakterystyki wzbogacalności węgla wymaga przeprowadzenia pracochłonnych i czasochłonnych analiz. Poszukuje się metod, pozwalających aproksymować krzywe wzbogacalności na podstawie danych uzyskanych dla dwóch gęstości rozdziału. Podstawę aproksymacji charakterystyk jest uzasadniony praktycznie lub teoretycznie opis matematyczny nadawy. Poniżej przedstawiono przegląd modeli nadawy.

2. MODELE NADAWY

Model nr 1 [3]

Istotą modelu jest założenie, że między zawartością popiołu ψ , a wychodem Γ lekkiej frakcji rozdziału danej porcji węgla zachodzi związek

$$\psi = A \exp[-w_1(100A - \Gamma\psi)^{w_2}] \quad (1)$$

A - zawartość popiołu w nadawie,

w_1, w_2 - współczynniki równania.

Współczynniki w_1 i w_2 mogą być wyznaczone na podstawie wychodów i zawartości popiołu lekkiej frakcji dla dwóch gęstości rozdziału ϱ_1 i ϱ_2 ($\varrho_1 < \varrho_2$) wynoszących odpowiednio $\Gamma_1, \psi_1, \Gamma_2, \psi_2$ ze wzorów:

$$w_2 = \frac{\ln \ln \frac{A}{\psi_1} - \ln \ln \frac{A}{\psi_2}}{\ln(100A - \Gamma_1\psi_1) - \ln(100A - \Gamma_2\psi_2)}$$

$$w_1 = \frac{\ln \frac{A}{\psi_1}}{(100A - \Gamma_1\psi_1)^{w_2}}$$

Dla znanych wartości Γ_1 wychodów poszczególnych frakcji gęstościowych możemy obliczyć odpowiadające im zawartości popiołu λ_1 ze wzoru:

$$\lambda_1 = \frac{\Gamma(\varrho_1)\psi(\varrho_1) - \Gamma(\varrho_{i-1})\psi(\varrho_{i-1})}{\Gamma(\varrho_1) - \Gamma(\varrho_{i-1})}$$

ϱ_{i-1}, ϱ_i - granice gęstości i -tej frakcji,

$\psi(\varrho_{i-1}), \psi(\varrho_i)$ - wartości obliczone na podstawie wzoru (1).

Model nr 2 [2, 4]

Model ten zakłada liniową zależność (w zakresie istotnym dla krzywych wzbogacalności) pomiędzy zawartością popiołu w lekkiej frakcji, a odwrotnością jej gęstości.

W metodzie tej wychód Γ i zawartość popiołu ψ lekkiej frakcji rozdziału danej porcji węgla możemy obliczyć ze wzorów:

$$\psi = w_1 + w_2 \left(\frac{1}{\varrho} - \frac{1}{\varrho_0} \right), \quad (2)$$

$$\Gamma = \Gamma_1 \left(\frac{1/\varrho_0 - 1/\varrho}{1/\varrho_0 - 1/\varrho_1} \right)^{w_3} \quad (2)$$

ϱ_0 - gęstość najlżejszych ziarn - Dobrzelecki, autor metody proponuje przyjęcie wartości 1270 kg/m^3 ,

Γ_1 - wychód frakcji lekkiej odpowiadający gęstości ϱ_1 .

Wartości współczynników w_1, w_2, w_3 oblicza się na podstawie wartości $\Gamma_1, v_1, \Gamma_2, v_2$ odpowiadającym dwóm gęstościom rozdziału ϱ_1 i ϱ_2 ($\varrho_1 < \varrho_2$) wg wzorów:

$$w_2 = \frac{v_2 - v_1}{1/\varrho_1 - 1/\varrho_2},$$

$$w_1 = v_1 - w_2(1/\varrho_0 - 1/\varrho_1),$$

$$w_3 = \frac{\ln(\Gamma_2/\Gamma_1)}{\ln[(1/\varrho_0 - 1/\varrho_2)/(1/\varrho_0 - 1/\varrho_1)]}.$$

Wychód γ_i i zawartość popiołu λ_i w i-tej frakcji o średniej gęstości $\varrho = (\varrho_{i-1} + \varrho_i)/2$ obliczamy ze wzorów:

$$\gamma_i = \Gamma(\varrho_i) - \Gamma(\varrho_{i-1}),$$

$$\lambda_i = v(\varrho_{i-1}) + 0,5 \frac{\Gamma(\varrho_i)v(\varrho_i) - \Gamma(\varrho_{i-1})v(\varrho_{i-1})}{\Gamma(\varrho_i)} \quad (3)$$

W pracy [2] Dobrzelecki przeprowadził ocenę dokładności proponowanej metody na podstawie 37 charakterystyk wzbogacalności dla węgla z różnych klas ziarnowych, pochodzących z różnych kopalń. Błąd wyznaczenia krzywej $v(\varrho)$ dla przedziału ϱ od 1400 do 1800 kg/m^3 nie przekracza $0,4\%$ (wyjątkowo $0,6\%$), a dla mniejszych i większych gęstości szybko rośnie. Błąd wyznaczenia charakterystyki $\Gamma(\varrho)$ w przedziale ϱ od 1400 do 1800 kg/m^3 nie przekracza 3% (wyjątkowo do 5%), a dla gęstości spoza tego przedziału również rośnie. Podane wartości błędów odnoszą się do różnic $v_{obl} - v, \Gamma_{obl} - \Gamma$.

Model nr 3 [5]

Model został opracowany w Ukraińskim Instytucie Naukowo-Badawczym i jako norma obowiązuje w Związku Radzieckim od dnia 1975.08.01. Na podstawie informacji o nadawie rozdzielonej w dwóch cieczach ciężkich o gęstościach ϱ_1 i ϱ_2 i ustalonych wartościach wychodów i zawartości popiołu we frakcjach (tab. 1) możemy aproksymować przebieg krzywych λ i v .

Tabela 1

Wyniki analizy gęstościowej
przeprowadzonej w dwóch cieczach ciężkich

Gęstość frakcji	Wychód	Zawartość popiołu
$-\varrho_1$	γ_1	λ_1
$\varrho_1 - \varrho_2$	γ_2	λ_2
$+\varrho_2$	γ_3	λ_3

Krzywą $\lambda(\gamma)$ określamy jak następuje:

- w zakresie gęstości do ϱ_1 :

$$\lambda = \lambda_{\min} + w_2 \gamma^1.$$

- w zakresie gęstości $\varrho_1 - \varrho_2$:

$$\lambda = \lambda_{1k} + w_5 \gamma^4 + w_3 \gamma.$$

- w zakresie gęstości powyżej ϱ_2 :

$$\lambda = \lambda_{2k} + w_6 \gamma + w_7 \gamma^2.$$

W powyższych wzorach oznaczono:

λ_{1k} - zawartość popiołu na końcu 1-tego przedziału,

$$\lambda_{1k} = 22,70 + \lambda_1(0,92 - 0,01\lambda_1) + \lambda_2(0,02\lambda_2 - 0,90) + \gamma_2(0,01\gamma_2 - 0,15),$$

$$\lambda_{2k} = 92,68 + \lambda_2(0,09\lambda_2 - 4,93) + \lambda_3(0,001\lambda_3 - 0,13) + \gamma_2(1,12 - 0,04\gamma_2),$$

$$\lambda_{3k} = 81,15 + \lambda_3(4,28 - 0,03\lambda_3) + \gamma_3(0,01\gamma_3 - 2,58) + 0,03\gamma_3\lambda_3,$$

$$\lambda_{\min} = 0,88 + 0,28\lambda_1,$$

$$w_1 = \frac{\lambda_{1k} - \lambda_{\min}}{\lambda_1 - \lambda_{\min}} - 1, \quad w_2 = (\lambda_{1k} - \lambda_{\min})/\gamma_1^1.$$

$$w_3 = w_1 w_2 \gamma_1^{w_1 - 1}, \quad w_4 = (\lambda_{2k} - \lambda_3 \gamma_2 / 2) / (\lambda_2 - \lambda_{1k} - w_3 \gamma_2 / \lambda).$$

$$w_5 = (\lambda_{2k} - \lambda_2 - w_3 \gamma_2 / 2) / \gamma_2^4, \quad w_6 = 2(3\lambda_3 - \lambda_{3k} - 2\lambda_{2k}) / \gamma_3.$$

$$w_7 = 3(\lambda_{3k} - 2\lambda_3 + \lambda_{2k}) / \gamma_3^2.$$

Przez λ_{\min} oznaczono zawartość popiołu frakcji o najmniejszej gęstości. Do obliczeń w powyższych wzorach wartości γ wyrażamy w ułamkach, a nie procentach.

Krzywą $y(\rho)$ wykreślamy wg wzoru

$$y = \lambda_1 + \frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} (\lambda_2 - \lambda_1) \frac{1/\rho_1 - 1/\rho}{1/\rho_1 - 1/\rho_2} \quad (4)$$

Wychody frakcji obliczamy z zależności:

- wychód najbliższej frakcji $\Gamma_{\rho_{\min}}$:

$$\Gamma_{\rho_{\min}} = \frac{\lambda_{\rho_{\min}-\rho_1} - \lambda_1}{\lambda_{\rho_{\min}-\rho_1} - y_{\min}} \gamma_1$$

- w zakresie gęstości $\rho_{\min} - \rho_2$:

$$\Gamma = \frac{1}{y} \left[y_{\min} \Gamma_{\rho_{\min}} + \left(\frac{1}{w_9} \ln \frac{y}{y_{\min}} \right)^{1/w_8} \right]$$

- w zakresie gęstości powyżej ρ_2 :

$$\Gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \frac{100 - \gamma_1 - \gamma_2}{A} \left(y - \frac{\gamma_1 \lambda_1 + \gamma_2 \lambda_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \right)$$

Oznaczenia:

y_{\min} - zawartość popiołu w najbliższej frakcji obliczona ze wzoru (4),

$\lambda_{\rho_{\min}-\rho_1}$ - zawartość popiołu we frakcji o zakresie gęstości od ρ_{\min} do ρ_1 ,

A - zawartość popiołu w węglu surowym

$$w_8 = \frac{\ln \ln \frac{\gamma_1 \lambda_1 + \gamma_2 \lambda_2}{\gamma_1 + \gamma_2 y_{\min}} - \ln \ln \frac{\lambda_1}{y_{\min}}}{\ln \left(1 + \frac{\gamma_2 \lambda_2}{\gamma_1 \lambda_1 - y_{\min} \Gamma_{\rho_{\min}}} \right)}$$

$$w_9 = \frac{\ln(\lambda_1 / y_{\min})}{(\gamma_1 \lambda_1 - y_{\min} \Gamma_{\rho_{\min}})^{w_8}}$$

Opisane metody wyznaczania krzywych λ i ν obowiązują dla gęstości rozdzielców ρ_1 i ρ_2 spełniających warunki:

- dla węgla kamiennego

$$\rho_1 = 1400-1600 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_2 = 1800-2000 \text{ kg/m}^3,$$

- dla antracytu:

$$\rho_1 = 1700-1900 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_2 = 2000-2200 \text{ kg/m}^3.$$

Wychód T_1 i zawartość popiołu λ_1 w i-tej frakcji o średniej gęstości $\rho = (\rho_i + \rho_{i-1})/2$ obliczamy ze wzorów:

$$T_1 = \Gamma(\rho_i) - \Gamma(\rho_{i-1}),$$

$$\lambda_1 = \left[\Gamma(\rho_i)\nu(\rho_i) - \Gamma(\rho_{i-1})\nu(\rho_{i-1}) \right] / \left[\Gamma(\rho_i) - \Gamma(\rho_{i-1}) \right], \quad (5)$$

Model nr 4

Wyniki analizy gęstościowej można opisać tzw. krzywą separacji $\beta = \beta(\xi)$, przy czym ξ przedstawia uzysk popiołu w odpadach, a β - zawartość popiołu w odpadach. Krzywa ta po transformacji:

$$x = 100 - \xi \quad y = 100 \frac{\beta_T - \beta}{\beta_T - A}$$

β_T - teoretycznie możliwa zawartość popiołu w czystych odpadach (przyjmujemy $\beta_T = 100\%$)

przedstawia wycinek hiperboli

$$y = \frac{w_1}{x + w_2} - w_3, \quad (6)$$

spełniającej warunki:

$$y = 100 \quad \text{dla} \quad x = 0$$

$$y = 0 \quad \text{dla} \quad x = 100 \quad (7)$$

Brożek w [1] badał węgiel energetyczny, koksujący i antracytowy z czterech kopalń i porównał otrzymane dane doświadczalne z kształtem teoretycznie obliczonych hiperboli, uzyskując indeks korelacji krzywoliniowej większy od 97%. Świadczy to o możliwości wykorzystania zależności (6) do aproksymacji charakterystyk wzbogacalności. W tym celu podstawiamy w miejsce ξ wyrażenie $\beta \tau_0/A$ (τ_0 - wychód odpadów) i po uwzględnieniu warunków (7), otrzymujemy

$$\beta^2 \tau_0^2 - \beta [(100 + a) A + \tau_0 (100 + \frac{100-A}{100} a)] + 100 (100+a)A = 0. \quad (8)$$

Wartość współczynnika a , noszącego nazwę współczynnika uwolnienia, możemy wyznaczyć w oparciu o znajomość tylko jednej pary współrzędnych (x, y) , czyli w oparciu o pomiar wychodu i zawartości popiołu cięższej frakcji dla jednej gęstości rozdziału

$$a = \frac{xv}{100 - x - y}$$

Dla pełnego określenia równania (8) potrzebna jest również znajomość zawartości popiołu w węglu surowym A .

Proponowaną metodę autor zastosował do aproksymacji charakterystyki y dla różnych typów węgla pochodzących z różnych kopalń. Przedmiotem analizy było:

- dobór gęstości rozdziału ρ_r dla wyznaczania wartości współczynnika uwolnienia a ,
- dokładność aproksymacji.

W celu wyznaczenia optymalnej gęstości rozdziału ρ_r wykonano obliczenia, wykorzystując dane ośmiu węgla różnych klas ziarnowych z różnych kopalń. Jako przykładowe zaprezentowano w tabelach 2, 3, 4 wyniki uzyskane dla węgla energetycznego z kopalni Brzeszcze, węgla antracytowego z kopalni Victoria i w celu bezpośredniego porównania rezultatów różnych metod - dane z przykładu cytowanego w pracy [2]. Do dalszych rozważań przyjęto wartość $\rho_r = 1800 \text{ kg/m}^3$.

Dokładność aproksymacji sprawdzono wykonując obliczenia dla 29 charakterystyk węgla z różnych kopalń - tab. 5.

W zakresie gęstości do 1400 kg/m^3 błąd jest mniejszy od 1% (wyjątkowo do 2%). W zakresie gęstości od 1400 do 1800 kg/m^3 błąd nie przekracza wartości 0,5% (wyjątkowo 1%). W zakresie gęstości powyżej 1800 kg/m^3 błąd z reguły bardzo mały (rzędu około 0,15%) może osiągać większe wartości przy rozpatrywaniu frakcji o dużych gęstościach, np.: dla frakcji $2100-2200 \text{ kg/m}^3$ z KWK Dębieńsko zanotowano ekstremalną wartość 1,54%.

Tabela 2

Błędy aproksymacji krzywej $\lambda(\rho)$ metodą nr 4 dla różnych wartości współczynnika uwolnienia, a obliczonego dla różnych gęstości rozdziału ρ_r
 Węgiel energetyczny z KWK Brzeszcze, klasa ziarnowa 4-0,1 mm

Frakcja 10^3 kg/m^3	γ %	λ %	$\lambda_{obl} - \lambda$ %	$\lambda_{obl} - \lambda$ %	$\lambda_{obl} - \lambda$ %	$\lambda_{obl} - \lambda$ %
-1,26	0,98	0,91	-0,18	-0,54	-0,60	-0,62
1,26-1,28	11,56	0,94	-0,11	-0,52	-0,58	-0,60
1,28-1,30	30,68	1,36	0,05	-0,61	-0,72	-0,75
1,30-1,32	21,80	2,66	0,58	-0,70	-0,94	-1,02
1,32-1,35	11,13	5,53	1,33	-0,66	-1,12	-1,27
1,35-1,40	7,61	8,23	4,26	2,40	1,83	1,62
1,40-1,50	5,92	15,10	5,71	6,01	5,87	5,81
1,50-1,60	2,06	25,27	3,78	7,46	8,27	8,53
1,60-1,80	1,52	38,01	-2,79	3,57	5,16	5,70
1,80-2,00	0,84	47,92	-7,68	0,65	2,77	3,50
+2,00	6,85	79,10	-12,43	-3,11	-1,09	-0,43
$\rho_r, 10^3 \text{ kg/m}^3$			1,32	1,60	1,80	2,00

Tabela 3

Błędy aproksymacji krzywej $\nu(\rho)$ metodą nr 4 dla różnych wartości współczynnika uwolnienia, a wyznaczonego na podstawie pomiaru dla gęstości ρ_r

Węgiel antracytowy z KWK Victoria, klasa ziarnowa 4-0,1 mm

Frakcja 10^3 kg/m^3	γ %	ν %	$\nu_{obl} - \nu$ %	$\nu_{obl} - \nu$ %
-1,33	4,15	0,83	-0,08	-0,36
1,33-1,35	31,78	1,33	-0,16	-0,59
1,35-1,40	29,69	2,39	0,00	-0,77
1,40-1,50	13,42	3,54	0,68	-0,30
1,50-1,60	3,08	4,15	0,85	-0,12
1,60-1,80	2,05	4,75	0,92	0,00
1,80-2,00	2,05	5,59	0,87	0,04
+2,00	13,78	15,58		
$\rho_r, 10^3 \text{ kg/m}^3$			1,35	1,80

Tabela 4

Błędy aproksymacji krzywej $\gamma(\rho)$ metodą nr 4 dla różnych wartości współczynnika uwolnienia, a wyznaczonego na podstawie pomiaru dla gęstości ρ_r . Dane doświadczalne zaczerpnięto z przykładu podanego w pracy Dobrzeleckiego [2]

Fracja 10^3 kg/m^3	γ %	γ %	$\gamma_{obl} - \gamma$ %	$\gamma_{obl} - \gamma$ %
-1,35	67,70	2,39	-0,14	0,05
1,35-1,40	4,96	2,90	0,02	0,23
1,40-1,50	3,73	3,62	0,06	0,29
1,50-1,60	1,98	4,23	0,00	0,23
1,60-1,70	1,54	4,85	-0,11	0,12
1,70-1,80	1,32	5,47	-0,22	0,00
1,80-1,90	1,25	6,16	-0,36	-0,15
1,90-2,00	1,38	6,99	-0,50	-0,31
2,00-2,10	2,11	8,39	-0,69	-0,54
+2,10				
$\rho_r, 10^3 \text{ kg/m}^3$			1,60	1,80

Tabela 5

Zbiór charakterystyk węgla wykorzystany do obliczeń

Nr	Klasa ziarnowa mm	Pochodzenie węgla
1	2	3
1	250-80	Knurów, pokład 355
2	80-30	Knurów, pokład 355
3	30-0	Knurów, pokład 355
4	80-30	Knurów, pokład 359
5	250-80	Knurów, pokład 361
6	80-30	Knurów, pokład 361
7	30-0	Knurów, pokład 361
8	250-80	Knurów, pokład 406/3
9	80-30	Knurów, pokład 406/3
10	30-0	Knurów, pokład 406/3
11	20-0	Knurów, nadawa na osadzarkę
12	10-0,5	Knurów, nadawa na DISA
13	20-0,5	Czerwone Zagłębie, pokład 409
14	4-0,1	Brzeszcze
15	2-0,1	Brzeszcze
16	1-0,1	Brzeszcze
17	4-0,1	Victoria

cd. tabeli 5

1	2	3
18	2-0,1	Victoria
19	1-0,1	Victoria
20	4-0,1	Jastrzębie
21	2-0,1	Jastrzębie
22	1-0,1	Jastrzębie
23	20-0,75	Manifest Lipcowy
24	14-0,5	Dębieńsko
25	14-0,5	Dębieńsko
26	20-0,5	Borynia, pokład 405
27	20-0,5	Borynia, pokład 407
28	20-0	Bogdanka I, pokład 382
29	400-20	Gliwice, pokład 845

3. ANALIZA PORÓWNAWCZA MODELI NADAWY

Podane w rozdziale 2 wielkości błędów aproksymacji wg modeli nr 2 i 4 pozwalają na wyróżnienie modelu nr 2 jako dokładniejszego w interesującym nas zakresie gęstości. W celu porównania modeli nr 1, 2 i 3 przeprowadzono obliczenia dla 34 krzywych wzbogacalności z różnych kopalń - tab. 6.

Tabela 6

Dane o węglach dla poszczególnych obliczeń

Nr	Klasa ziarnowa mm	Pochodzenie węgla
1	4-0,1	Brzeszcze
2	2-0,1	Brzeszcze
3	1-0,1	Brzeszcze
4	4-0,1	Victoria
5	2-0,1	Victoria
6	1-0,1	Victoria
7	4-0,1	Jastrzębie
8	2-0,1	Jastrzębie
9	1-0,1	Jastrzębie
10	20-0,75	Manifest Lipcowy
11	14-0,5	Dębieńsko
12	14-0,5	Dębieńsko
13	20-0,5	Borynia, pokład 405
14	20-0,5	Borynia, pokład 407
15	20-0	Bogdanka I, pokład 382
16	400-20	Gliwice, pokład 845

cd. tabeli 6

Nr	Klasa ziarnowa mm	Pochodzenie węgla
17	20-0,5	Czerwone Zagłębie, pokład 409
18	400-20	Gliwice, pokład 833
19	0,5-0,0	Bogdanka I, pokład 382
20	0,5-0,0	Bogdanka I, pokład 382
21	20-0,5	Czerwone Zagłębie, Mortimer-Porąbka
22	20-0,5	Czerwone Zagłębie, Klimontów
23	20-0,5	Czerwone Zagłębie, pokład 500
24	20-10	Anna
25	150-20	Anna
26	20-0,5	Janina
27	400-20	Janina
28	400-200	Janina
29	20-0,5	Jaworzno
30	200-20	Andaluzja
31	20-0,5	XXX-lecia PRL
32	400-20	Siersza
33	20-0,5	Siersza
34	20-0,5	Knurów

Jako kryterium dokładności przyjęto różnice pomiędzy obliczonymi i rzeczywistymi wartościami wychodów i zawartości popiołu poszczególnych frakcji gęstościowych. W wyniku przeprowadzonej analizy został odrzucony model nr 1 jako generujący wyniki obarczone największymi błędami (niejednokrotnie błąd względny przekraczał wartość 100%).

Dla lepszego porównania i oceny modeli nr 2 i 3 (w zakresie gęstości narzuconym przez model nr 2) przeprowadzono dodatkowe obliczenia w oparciu o dane z KWK Knurów. Przedstawiono przykładowe rezultaty obliczeń dla krzywych wzbogacalności pokładów 355, 359, 406/3, a średnie błędy aproksymacji dla dwóch serii pomiarowych nadawy (każda po 100 pomiarów) z wyróżnionymi czterema frakcjami. Do obliczeń przyjęto:

$$\varrho_1 = 1500 \text{ kg/m}^3 \quad \varrho_2 = 1800 \text{ kg/m}^3$$

Należy zwrócić uwagę, że zdarzają się przypadki, w których model nr 3 nie daje rozwiązania, gdyż algorytm obliczeniowy ulega zatrzymaniu ($\ln < 0$). W pierwszej i drugiej serii obliczeniowej zanotowano po cztery takie przypadki. W tab. 11 przedstawiono przypadki z pierwszej serii.

Model nr 2 daje dokładniejsze rezultaty obliczeń wychodów poszczególnych frakcji. Model nr 3 daje dokładniejsze rezultaty obliczeń zawartości popiołów poszczególnych frakcji. Należy zwrócić uwagę na identyczność podstawowych wzorów wyznaczających wartość $\psi(2)$ i (4) w obu metodach.

Tabela 7

Błędy aproksymacji metod nr 2 i 3
Dane z KWK Knurów, klasa ziarnowa 250-80 mm, pokład 355

Frakcja 10^{+3} kg/m ³	γ %	$\gamma_{obl} - \gamma, \%$	
		Metoda 2	Metoda 3
-1,30	36,00	10,37	16,88
1,30-1,35	16,22	-10,13	-15,50
1,35-1,40	4,29	-1,11	-2,18
1,40-1,45	1,93	0,23	0,08
1,45-1,50	0,98	0,64	0,72
1,50-1,60	3,70	-1,35	-1,17
1,60-1,70	0,91	0,76	0,76
1,70-1,80	0,69	0,58	0,41
1,80-2,00	0,21	1,64	11,23
+2,00	35,07	-1,64	-11,23

Frakcja 10^{+3} kg/m ³	λ %	$\lambda_{obl} - \lambda, \%$	
		Metoda 2	Metoda 3
-1,30	3,83	0,36	0,36
1,30-1,35	6,54	1,66	30,65
1,35-1,40	11,65	-1,09	3,83
1,40-1,45	16,25	-3,55	-0,18
1,45-1,50	20,00	-4,30	-1,09
1,50-1,60	23,80	-6,61	-2,18
1,60-1,70	29,70	-9,29	-1,54
1,70-1,80	39,61	-16,20	-2,64
1,80-2,00	44,51	-17,66	-31,24
+2,00	86,94	-33,89	-51,49

Tabela 8

Błędy aproksymacji metod nr 2 i 3

Dane z KWK Knurów, klasa ziarnowa 80-30 mm, pokład 359

Fracja 10^3 kg/m^3	\bar{x} %	$\bar{x}_{\text{obl}} - \bar{x}$, %	
		Metoda 2	Metoda 3
-1,30	23,45	15,90	20,38
1,30-1,35	17,78	-11,97	-16,60
1,35-1,40	5,17	-2,11	-2,52
1,40-1,45	3,47	-1,38	-1,12
1,45-1,50	2,00	-0,44	-0,13
1,50-1,60	2,80	-0,50	-0,17
1,60-1,70	1,47	0,17	0,12
1,70-1,80	0,91	0,33	0,05
1,80-2,00	3,05	-1,23	11,50
+2,00	39,87	1,23	-11,50
Fracja 10^3 kg/m^3	λ %	$\lambda_{\text{obl}} - \lambda$, %	
		Metoda 2	Metoda 3
-1,30	3,08	1,09	1,09
1,30-1,35	6,52	1,94	19,30
1,35-1,40	9,08	2,17	5,13
1,40-1,45	14,70	-0,89	1,02
1,45-1,50	17,97	-1,81	0,37
1,50-1,60	25,58	-6,48	-2,18
1,60-1,70	32,75	-9,73	0,06
1,70-1,80	42,08	-15,60	4,16
1,80-2,00	56,64	-26,11	-42,77
+2,00	80,70	-30,90	-41,99

Tabela 9

Błędy aproksymacji metod nr 2 i 3
Dane z KWK Knurów, klasa ziarnowa 30-0 mm, pokład 406/3

Frakcja 10^3 kg/m^3	γ %	$\gamma_{\text{obl}} - \gamma, \%$	
		Metoda 2	Metoda 3
-1,30	32,58	-1,73	1,73
1,30-1,35	6,28	2,67	-9,22
1,35-1,40	7,73	-2,60	1,05
1,40-1,45	2,85	0,81	4,03
1,45-1,50	2,00	0,85	2,77
1,50-1,60	4,03	0,26	1,57
1,60-1,70	3,19	-0,03	-0,37
1,70-1,80	2,69	-0,22	-1,21
1,80-2,00	5,10	-1,44	18,76
+2,00	33,55	1,44	-18,76
Frakcja 10^3 kg/m^3	λ %	$\lambda_{\text{obl}} - \lambda, \%$	
		Metoda 2	Metoda 3
-1,30	3,03	-1,51	-1,52
1,30-1,35	5,98	-0,94	-17,59
1,35-1,40	10,84	-1,64	-2,84
1,40-1,45	16,55	-3,54	-5,34
1,45-1,50	20,55	-4,01	-4,79
1,50-1,60	29,64	-8,82	-5,11
1,60-1,70	37,29	-10,59	4,57
1,70-1,80	44,16	-12,27	24,34
1,80-2,00	55,53	-17,72	-36,01
+2,00	79,75	-27,01	-43,51

Tabela 10

Błędy aproksymacji metod nr 2 i 3

Dane z KWK Knurów; nadawa na osadzarkę, klasa ziarnowa 20-0,5 mm

$$\bar{b} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} (x_i - x_1)$$

$$k = \frac{\sqrt{\frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} [(x_i' - x_1) - \bar{b}]^2}}{\frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} x_i} \cdot 100\%$$

Parametr		Metoda nr 2		Metoda nr 3	
		\bar{b} , %	k, %	\bar{b} , %	k, %
I serie danych	γ_1	5,10	19,33	10,24	23,83
	γ_2	-5,10	63,15	-10,24	129,78
	λ_1	-0,07	39,21	-0,03	168,31
	λ_2	-1,91	45,31	6,75	95,06
II serie danych	γ_1	6,97	27,05	12,79	32,58
	γ_2	-6,97	73,38	-12,79	151,75
	λ_1	-0,21	49,49	-0,14	191,32
	λ_2	-0,98	38,52	6,63	41,41

Tabela 11

Przykładowe wyniki analiz gęstościowych, dla których algorytm obliczeniowy modelu nr 3 ulega zatrzymaniu

Nr pomiaru	γ_1 %	λ_1 %	γ_2 %	λ_2 %	γ_3 %	λ_3 %	γ_4 %	λ_4 %
29	28,2	1,9	14,3	7,1	43,3	31,3	14,0	86,0
51	3,0	1,8	1,0	8,2	92,0	25,6	4,0	74,6
56	38,1	1,8	18,7	7,9	10,0	32,0	33,2	78,4
76	43,2	1,7	11,7	7,4	5,8	39,2	39,2	80,6

Do dalszych zastosowań proponuję wykorzystać model nr 2 z modyfikacją - zamiast wzoru (3) na zawartość popiołu λ_1 we frakcji należy zastosować wzór (5).

4. WNIOSKI

Z powyższej analizy wynika, że wychody i zawartości popiołu frakcji gęstościowych węgla są najdokładniej obliczane przy użyciu modelu nr 2 z modyfikacją wzoru (3) na wzór (5). Uzyskiwana dokładność jest wystarczająca dla celów automatycznego sterowania, modelowania i symulacji procesów wzbogacania. Niewielka ilość informacji potrzebnych do określenia charakterystyk wzbogacalności węgla (w interesującym zakresie gęstości) i wynikające stąd uproszczenia analizy gęstościowej predysponuje proponowany model do wykorzystania w układach automatycznej identyfikacji parametrów nadawy.

LITERATURA

- [1] Brożek M.: Ocena stopnia uwolnienia frakcji mineralnej węgla na podstawie krzywej separacji Halla. Przegląd Górniczy 1984, nr 11.
- [2] Dobrzelecki R.: Metoda aproksymacji charakterystyk wzbogacalności węgla na podstawie danych dla dwóch gęstości rozdziału. Przegląd Górniczy 1982, nr 1-7.
- [3] Jampolski M., Chessin A.: Zawisimost vychoda vsplyvszego produkta ot jego zolnosti. Ugol Ukrainy 1969, nr 1.
- [4] Tarkiewicz A.: Optymalizacja i sterowanie procesów przeróbki mechanicznej węgla z wykorzystaniem cyfrowych modeli symulacyjnych. Praca doktorska (niepublikowana), Politechnika Śląska, Gliwice 1981.
- [5] Ugli buryje, kamiennyje, antracit i slancy goriuszije. GOST 4790-75, Moskwa 1975.

Recenzent: Doc. dr inż. Ryszard LACH

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1987 r.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОГАЩЕНИЯ
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Р е з ю м е

Определение полных характеристик обогатимости угля требует проведения анализов во многих жидкостях с разными плотностями. Упрощение исследований возможно путём ограничения количества жидкости. По мнению разных авторов представляют опинию что возможно произведение характеристик обогатимости на основе исследовании поведенных только для двух жидкости - таким образом на основе данных для двух плотности разделения.

В статье собраны представленные в польской и советской литературе методы аппроксимации характеристик обогатимости угля. Основой этих метод являются разные модели исходного материала. Представлены три известные модели ис-

ходного материала. Была предложена новая, четвёртая модель, основана на кривой сепарации Хальля.

С целью проверки точности представленных моделей был произведён ряд расчётов путём сравнения полученных характеристик с результатами полных анализов плотности. Была проверена точность восстановления характеристик обогатимости для углей из 34 польских шахт. Расчёты были сравнены по применению для целей автоматического управления, моделирования и конструирования моделей процессов обогащения. По мнению автора, была выбрана наиболее точная модель предлагаемая к этим целям.

MATHEMATICAL MODELLING OF COAL WASHABILITY CURVES FOR AUTOMATIC CONTROL PURPOSES

Summary

Many operations with different density liquids are needed for determination full coal or feed separation curves. We can simplify these researches by reducing number of liquids. Different authors are of the opinion, that it is possible to calculate separation curves on the grounds researches in two different density liquids - on the grounds data for two separation densities. The present writer collected approximation separation curves methods from Polish and Russian literature. These methods are based on different feed models. Three well known feed models are introduced. A new one, based on Halle's separation curve, is proposed. Many calculation for testing these models were made. Obtained results were compared with results full density analyses. Closeness of determination separation curves for coals from 34 Polish mines was checked. Calculate and accurate yields and contents ash of density fractions were compared. Calculations were made for purposes: automatic control, mathematical modelling and simulation of coal separation processes. The most accurate and suitable model to these purposes, in the opinion of the present writer, was selected.