

dr inż. MARCIN MICHALAK  
dr inż. SEBASTIAN IWASZENKO  
dr inż. KRZYSZTOF WIERZCHOWSKI  
Główny Instytut Górnictwa

## Coal analyzer – modelowanie procesu wzbogacania węgla w osadzarce

*W artykule przedstawiono założenia modelowania oraz opracowane na ich podstawie oprogramowanie służące do symulacji pracy osadzarki. Danymi wejściowymi do oprogramowania są dane z analizy densymetrycznej nadawy oraz parametry pracy urządzenia – jako rezultat wyznaczane są charakterystyki ilościowe i jakościowe uzyskiwanych produktów. Przedstawiono model matematyczny zaimplementowany w programie oraz opisano udostępniane przez oprogramowanie funkcje.*

### 1. WSTĘP

---

Proces wzbogacania węgla jest jednym z najważniejszych etapów procesu pozyskiwania tego surowca. Od skuteczności tego etapu zależą ilościowe i jakościowe parametry uzyskiwanego produktu, jak również charakterystyka powstających materiałów ubocznych, które zgodnie z obowiązującymi regulacjami powinny być zagospodarowane [6]. Prawidłowe zaprojektowanie ciągu technologicznego, dostosowanie go do charakterystyki dostarczanego urobku oraz zapewnienie stabilnych i oczekiwanych parametrów opuszczających go produktów jest zadaniem niezwykle złożonym. Jednym ze sposobów opanowania tej złożoności jest zastosowanie modelowania matematycznego. Modelowanie sprowadza się najczęściej do opisu pracujących urządzeń (lub całej linii technologicznej) za pomocą równań matematycznych. Wielkościami wejściowymi, występującymi w równaniach, są zwykle charakterystyka nadawy oraz parametry pracy urządzenia, zaś wielkościami wyjściowymi – charakterystyka ilościowa i jakościowa uzyskiwanego produktu oraz produktu ubocznego (lub produktów ubocznych). Rozwiązanie równań modelu i wyliczenie poszukiwanych wielkości może być efektywnie zrealizowane dzięki wykorzystaniu technologii informatycznych.

Jednym z urządzeń znajdujących szerokie zastosowanie w procesie wzbogacania węgla jest osadzarka.

Modele matematyczne, opisujące jej pracę, były przedmiotem wcześniejszych prac naukowo badawczych [1, 2]. Praktyczne zastosowanie tych modeli nie było proste ze względu na konieczność wykonania stosunkowo dużej liczby złożonych obliczeń. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie technologii informatycznych. W Głównym Instytucie Górnictwa podjęto próbę opracowania oprogramowania pozwalającego na określanie parametrów produktów uzyskiwanych w osadzarce w oparciu o wybrany model matematyczny. Uzyskane rezultaty zostały przedstawione w dalszej części artykułu.

### 2. MODELOWANIE KRZYWYCH WZBOGACALNOŚCI WĘGLA I PROCESU ROZDZIAŁU MATERIAŁU W OSADZARCE

---

Metodyka kreślenia krzywych wzbogacalności jest dokładnie opisana w stosownej literaturze [3, 4] i uregulowana poprzez normę PN-ISO 7936:1999 „Oznaczenie i przedstawianie charakterystyk wzbogacania grawitacyjnego” [5]. W praktyce sprawa jest dość złożona, bo oprócz wykonania analizy gęstościowej wraz z oznaczeniem zawartości popiołu w wydzielonych frakcjach wymaga wykonania szeregu obliczeń w celu wyznaczenia punktów, charakterystycznych dla poszczególnych krzywych, i naniesienia ich na wykres. Przyjęto tradycyjny, powszechnie praktykowany układ

wykresu, odbiegający nieco od wytycznych z normy PN-ISO 7936:1999, zawierający dodatkowo krzywą  $\delta$  podającą gęstości, w których wykonano analizę gęstościową. Wykres zawiera zatem cztery krzywe, wyszczególnione poniżej:

- $\lambda$  – krzywa zawartości popiołu w urobku węglowym,
- $\nu$  – krzywa koncentratu,
- $\beta$  – krzywa odpadów,
- $\delta$  – krzywa gęstości.

Punktem wyjścia do wyznaczania bilansu ilościowego i jakościowego produktów rozdziału w procesach wzbogacania są dane o strukturze densymetryczno-popiołowej nadawy poddawanej rozdziałowi. Podstawowy rachunek technologiczny oparty na modelu procesu wzbogacania wyrażony w formie krzywej rozdziału zakłada, że prawdopodobieństwo przejścia ziarn  $i$ -tej frakcji do produktu pływającego określone jest prawdopodobieństwem odpowiednim dla ziarna o ciężarze właściwym, będącym średnią arytmetyczną skrajnych ciężarów właściwych frakcji. Zakłada się, że prawdopodobieństwo dla średniej jest w przybliżeniu równe średniemu prawdopodobieństwu. Założenie to jest słuszne przy dostatecznie wąskich przedziałach gęstości frakcji, to znaczy przy odpowiednio dużej liczbie frakcji. W przypadku zbyt szerokich przedziałów frakcji gęstościowych błąd w wyznaczaniu parametrów produktów rozdziału może mieć istotne znaczenie technologiczne, szczególnie dla frakcji o dużym wychodzie.

Model procesu rozdziału grawitacyjnego węgla oparty jest na założeniu, że rozproszenie elementarnej frakcji wzbogacanego materiału podlega rozkładowi normalnemu, którego dystrybuenta opisana jest równaniem:

$$\Phi(\delta_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(\delta_i - \delta_r)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

gdzie:

$\delta_i$  – gęstość  $i$ -tej frakcji,

$\delta_r$  – gęstość rozdziału,

$\sigma$  – odchylenie standardowe.

Powszechnie przyjmuje się, że powyższa dystrybuenta opisuje z technologicznego punktu widzenia krzywą rozdziału w funkcji gęstości [1, 2, 3]. Zastosowany model rozdziału posiada następujące cechy charakterystyczne:

- jest wyrażony w formie krzywej rozdziału  $R(\delta)$ , gdzie poszczególne liczby rozdziału należą do przedziału  $0 \leq R_i \leq 1$ ,
- krzywa rozdziału opisana jest jako dystrybuenta rozkładu logarytmiczno-normalnego.

Parametry technologiczne operacji rozdziału są określone poprzez ciężar właściwy rozdziału  $\delta_r$  i imperfekcję  $I$ . Związek pomiędzy imperfekcją a odchyleniem standardowym jest następujący:

$$E_p = 0,6745\sigma \quad (2)$$

Empirycznie ustalona zależność rozproszenia prawdopodobnego  $E_p$  i imperfekcji dla wzbogacania w osadzarce jest następująca [1]:

$$E_p = \ln(I + \sqrt{I^2 + 1}) \quad (3)$$

Porównując stronami powyższe równania, znajdujemy związek pomiędzy odchyleniem standardowym  $\sigma$  rozkładu a imperfekcją wzbogacalnika:

$$\sigma = \frac{\ln(I + \sqrt{I^2 + 1})}{0,6745} \quad (4)$$

Wychody produktów wzbogacania wyznaczane są z następujących równań:

- wychód produktu tonącego (odpadów):

$$\gamma_o = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_{ni} R_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_{ni}} \quad (5)$$

- wychód produktu pływającego (koncentratu):

$$\gamma_k = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_{ni} (100 - R_i)}{\sum_{i=1}^n \gamma_{ni}} \quad (6)$$

Obliczenie parametrów jakościowych (zawartości popiołu, zawartości siarki lub wartości opałowej) produktów rozdziału oparte jest na założeniu, że parametry te w odpowiadających sobie frakcjach produktów rozdziału i nadawy są równe. Jest to podstawowe założenie przyjęte do opisywania procesów rozdziału poprzez krzywe rozdziału. Zawartość popiołu w produktach wzbogacania wyliczana jest z następujących równań:

$$A_o = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_{ni} R_i A_{ni}}{\sum_{i=1}^n \gamma_{ni}} \quad (7)$$

$$A_k = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_{ni} (R_i - 1) A_{ni}}{\sum_{i=1}^n \gamma_{ni}} \quad (8)$$

Analogicznie do powyższych równań obliczane są pozostałe parametry jakościowe produktów wzbogacania, tj. zawartości siarki całkowitej i wartości opalowe.

### 3. COAL ANALYZER – APLIKACJA MODELUJĄCA PROCES WZBOGACANIA WĘGLA

Coal Analyser to aplikacja okienkowa napisana w języku C#, przeznaczona do współpracy z systemem operacyjnym MS Windows wyposażonym w Microsoft .Net Framework 4.0. Jako źródło da-

nych wymaga pliku xls/xlsx o wyspecyfikowanym formacie. Program pozwala analizować dane wejściowe o różnej liczbie frakcji. Przykładowe dane wejściowe przedstawia tabela 1. Okno główne programu przedstawia rysunek 1.

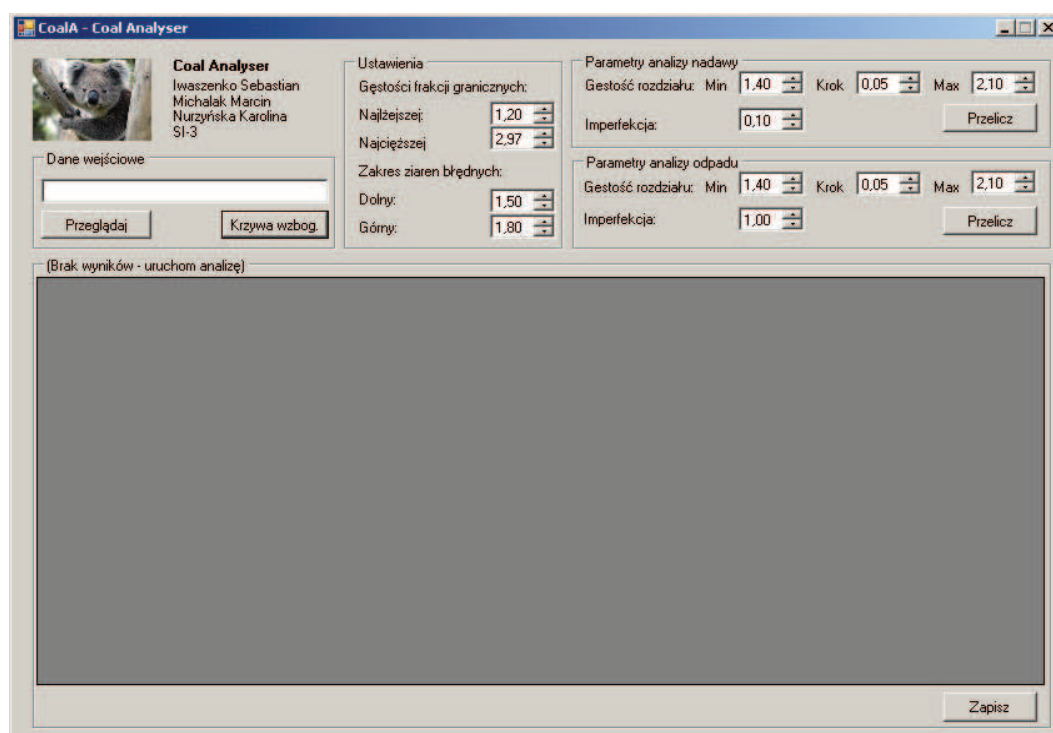
Sekcja „Ustawienia” pozwala zmienić domyślne wartości parametrów związanych z minimalną i maksymalną gęstością frakcji, jak również zakresem tzw. ziarn błędnych.

Wyniki analizy zarówno dwu-, jak i trójproduktowej przedstawiane są w postaci tabelarycznej. Można je również zachować bezpośrednio w postaci pliku xls poprzez kliknięcie przycisku „Zapisz”.

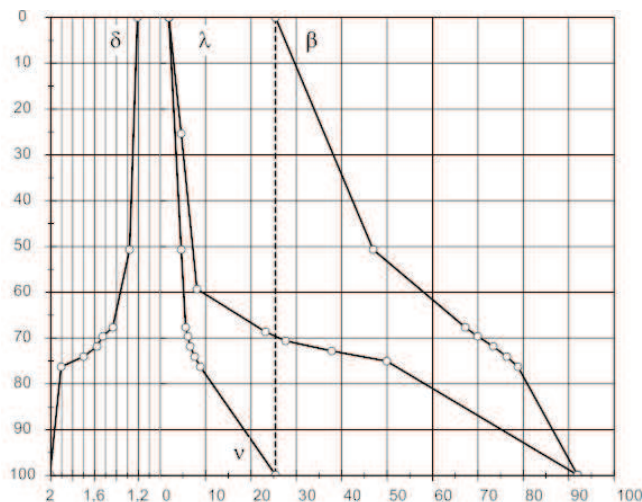
Tabela 1.

Przykładowa charakterystyka densymetryczna węgla [7]

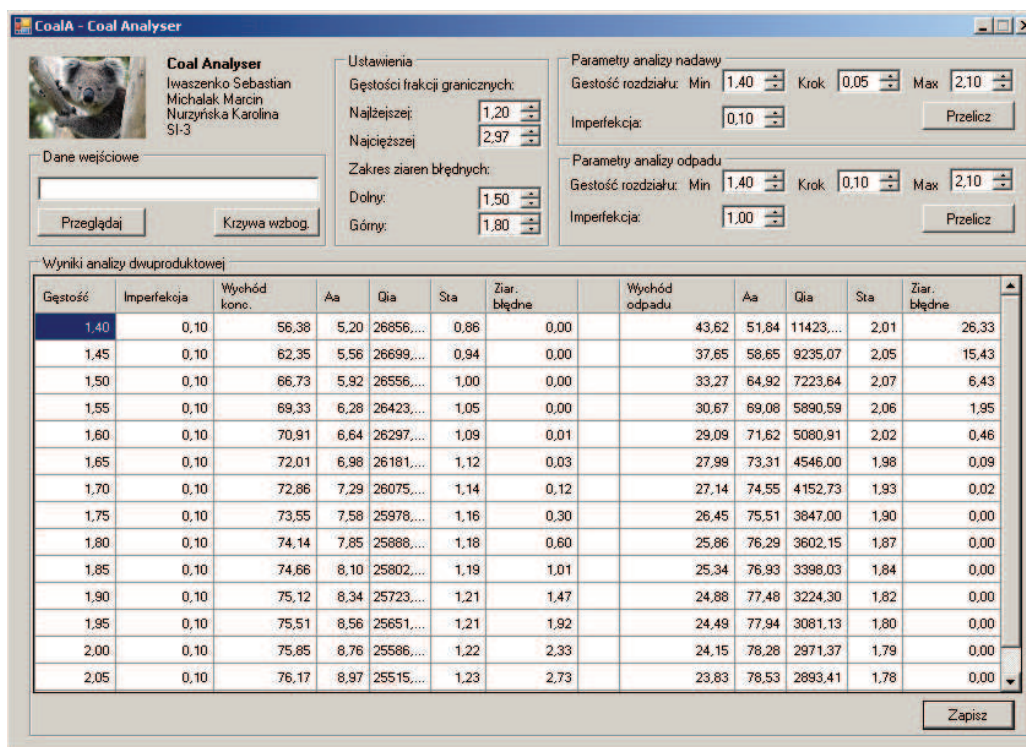
Gęstość ziarn g/cm <sup>3</sup>	Wychód frakcji %	Zawartość		
		popiołu %	siarki %	wartości opalowej kJ/kg
-1,35	50,9	4,84	0,76	27 024
1,35 - 1,5	16,9	8,26	1,71	25 432
1,5 - 1,55	1,9	23,19	2,36	20 394
1,55 - 1,6	2,2	27,87	3,53	19 009
1,6 - 1,8	2,2	37,90	3,63	15 738
1,8 - 2,0	2,2	49,92	2,75	11 937
+2,0	23,7	78,91	1,77	2 773
Razem	100,0	25,55	1,36	20 125



Rys. 1. Okno główne programu [7]



Rys. 2. Krzywe wzbogacalności dla danych z tabeli 1. [7]



Rys. 3. Wynik analizy dwuproduktowej [7]

### 3.1. Krzywe wzbogacalności

Po uruchomieniu programu i wczytaniu danych można przystąpić od razu do generowania krzywych wzbogacalności. Rysunek 2. ukazuje krzywe wzbogacalności dla węgla o charakterystyce, którą przedstawiono w tabeli 1.

### 3.2. Prognozowanie wzbogacania dwuproduktowego

Sekcja „Parametry analizy nadawy” pozwala ustawić wartości parametrów dla analizy dwuproduktowej.

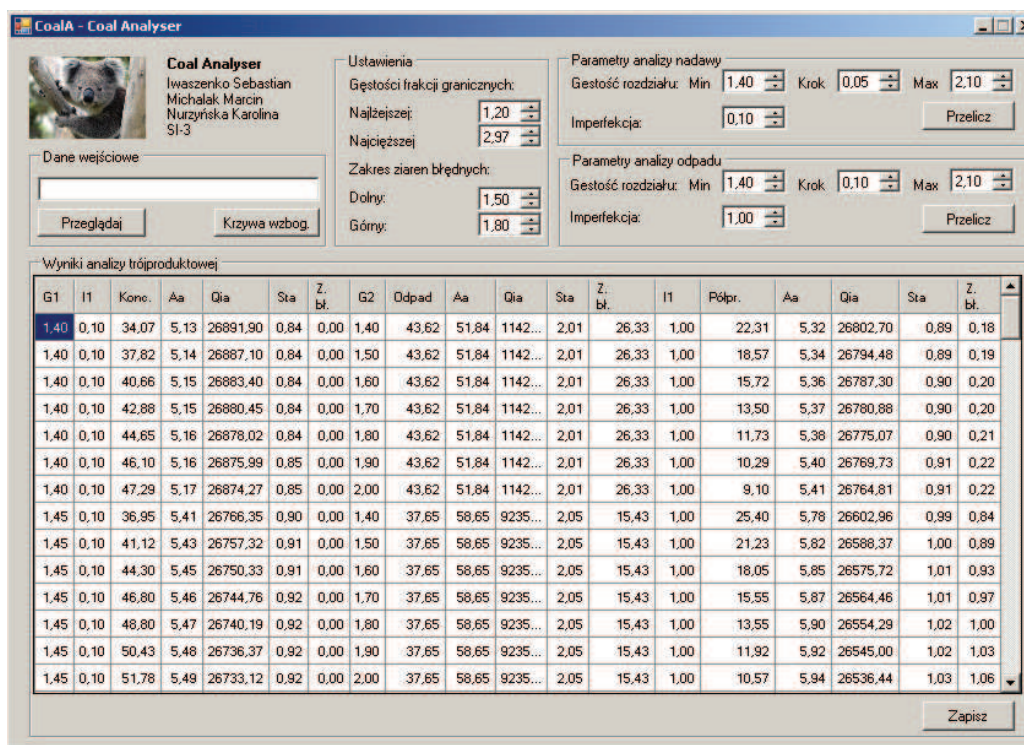
Są to przede wszystkim minimalna i maksymalna gęstość rozdziału oraz krok, z jakim gęstość rozdziału będzie ulegać zmianie. Ponadto można zmienić wartość współczynnika imperfekcji.

Okno programu z wynikiem analizy dwuproduktowej przedstawiono na rysunku 3.

### 3.3. Prognozowanie wzbogacania trójproduktowego

Sekcja „Parametry analizy odpadu” odpowiada za definiowanie parametrów drugiego stopnia rozdziału w przypadku analizy trójproduktowej. Są to zmienne





Rys. 4. Wynik analizy trójproduktowej [7]

analogiczne, jak w poprzedniej sekcji. Wykonując analizę trójproduktową, program w pierwszym stopniu rozdziału korzysta z parametrów zdefiniowanych w sekcji „Parametry analizy nadawy”, a następnie dla każdej gęstości rozdziału wykonuje podział odpadu wg parametrów ustalonych w sekcji „Parametry analizy odpadu”.

Okno programu z wynikiem analizy trójproduktowej przedstawiono na rysunku 4.

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono model matematyczny wykorzystany do opracowania oprogramowania wspierającego projektowanie ciągów technologicznych i instalacji wzbogacania węgla.

Zaprezentowane oprogramowanie pozwala na prognozowanie parametrów ilościowych i jakościowych produktów wzbogacania w osadzarkach w zależności od charakterystyki nadawy i założonych parametrów pracy, przy czym przez charakterystykę nadawy rozumie się rezultaty analizy densymetrycznej – parametry pracy urządzenia zadawane są przez gęstość rozdziału oraz imperfekcję.

Oprogramowanie pozwala na wyznaczenie parametrów produktów w dwu- i/lub trójproduktowym reżimie wzbogacania. Możliwe jest również zautomatyzowane wykreślenie krzywych wzbogacalno-

ści. Program pozwala na import danych z arkusza MS Excel w sprecyzowanym formacie. Uzyskane rezultaty obliczeń mogą być również zapisane w formie arkusza kalkulacyjnego.

Opracowane oprogramowanie potwierdziło swoją użyteczność praktyczną i stanowi cenne wsparcie dla ekspertów dokonujących predykcji parametrów produktów uzyskiwanych z osadzarki.

#### Literatura

1. Kolin K., Gembala W., Wycisk H.: *Metoda TOP/I projektowania technologii wzbogacania węgla w oparciu o programy pakietu TOP*, GIG, Katowice 1978.
2. *Metoda prognozowania wyników wzbogacania węgla w osadzarkach dla potrzeb gwarancyjnych obliczeń projektowych*, Praca GIG nr 102.07.02/N07/84/R [niepublikowana].
3. Nawrocki J.: *Analityczno-graficzne metody oceny pracy wzbogacalników grawitacyjnych*, Śląsk, Katowice 1976 r.
4. Stepiński W.: *Wzbogacanie grawitacyjne*, PWN, Warszawa 1964.
5. PN-ISO 7936:1999 „Oznaczanie i przedstawianie charakterystyk wzbogacania grawitacyjnego”.
6. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach. Dz. U. 2001 nr 62 poz. 628 z późn. zm.
7. Praca statutowa GIG nr 11410511-354 [niepublikowana].

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów