ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996
Seria: GÓRNICTWO z. 231 Nr kol. 1349

Stanisław CIERPISZ, Joachim PIELOT
Politechnika Śląska, Gliwice

OPTYMALIZACJA PROCESÓW PRZERÓBKI WĘGLA Z ZASTOSOWANIEM SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

Streszczenie. Przedstawiono zastosowanie komputerowego modelu symulacyjnego procesów przeróbki mechanicznej węgla pozwalającego na wielowariantowe analizy ilościowo-jakościowe tych procesów. Dla przykładowej struktury technologicznej przedstawiono analizy pracy przy zmiennych parametrach rozdziału maszyn przeróbczych. Dokonano doboru optymalnych parametrów rozdziału.

OPTIMIZATION OF COAL PREPARATION PROCESSES USING COMPUTER SIMULATION

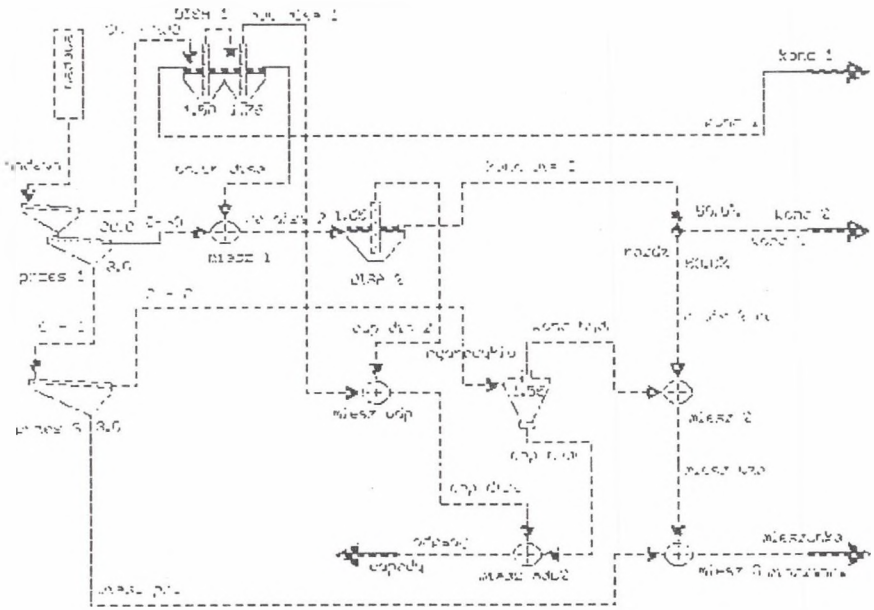
Summary. This paper concentrates on application of computer simulation model for coal preparation processes. The model enables qualitative and quantitative analysis of these processes. Results of such analysis for a given technological scheme have been presented in the paper. Optimal parameters of separation have been also chosen.

1. Wstęp

Rezultatami eksploatacji, a następnie przeróbki mechanicznej kopaliny użytecznej są najczęściej trzy rodzaje produktów wzbogacania: koncentrat, produkt pośredni i odpady. W górnictwie węgla kamiennego dąży się do uzyskiwania jak największej ilości koncentratów węgla o dobrych parametrach jakościowych, a jednocześnie poważnym problemem ekologicznym jest składowanie odpadów powęglowych będące obciążeniem środowiska naturalnego. Skutecznym narzędziem w projektowaniu złożonych układów sterowania procesów przeróbki mechanicznej węgla, złożonych z kilku obiektów sterowania (maszyn wzbogacających, przesiewaczy, mieszalników i rozdzielaczy strumieni), są komputerowe modele symulacyjne, które pozwalają na wielowariantową analizę ilościowo - jakościową tych procesów [2, 3].

2. Charakterystyka przykładowego schematu technologicznego

W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych utworzony został przykładowy schemat technologiczny przedstawiony na rys.1, zawierający kilka wybranych maszyn przeróbczych tworzących łącznie strukturę technologiczną ZPMW. W schemacie tym znajduje się symbol strumienia węgla surowego - nadawy, przesiewacz dwusitowy (w układzie I) o wymiarach oczek sit odpowiednio 30 i 8 mm, przesiewacz jednositowy o wymiarze oczka sita 3 mm, trójproduktowy wzbogacalnik DISA o gęstościach rozdziału 1.50 g/cm^3 oraz 1.75 g/cm^3, dwuproduktowy wzbogacalnik DISA o gęstości rozdziału 1.65 g/cm^3, hydrocyklon o umownej gęstości rozdziału 1.55 g/cm^3, rozdzielacz strumieni o współczynniku rozdziału 50%, symbole łączenia odpowiednich strumieni węgla i symbole strumieni wyjściowych przedstawiające sortymenty handlowe (*konc 1*, *konc 2*, *mieszanka*) i odpady kamienne (*odpady*).



Rys.1. Schemat przykładowego schematu technologicznego
Fig.1. The technological scheme analysed using computer simulation

Strumień węgla surowego - nadawy poddawany zostaje klasyfikacji poprzez podanie go na układ dwóch przesiewaczy (rys.1). Ziarna o największych wymiarach są kierowane do trójproduktowego wzbogacalnika *DISA 1*, którego koncentrat jest sortymentem handlowym o nazwie *konc 1*. Frakcje tonące pierwszej komory wzbogacalnika *DISA 1* pozbawione ziarn o najmniejszej gęstości są poddawane ponownemu wzbogacaniu w drugiej komorze tego wzbogacalnika. Otrzymany półprodukt oraz ziarna nadawy o wymiarach 8 - 30 mm są kierowane do wzbogacalnika *DISA 2*. Ziarna nadawy o wymiarach 3 - 8 mm, czyli znacząca część najliczniejszej 7. klasy nadawy (scharakteryzowanej w p.2.1), są doprowadzone do oddzielnej maszyny wzbogacającej - hydrocyklonu. Koncentrat tego hydrocyklonu i koncentrat wzbogacalnika *DISA 2* wraz z najdrobniejszymi niewzbogacanymi ziarnami nadawy (0 - 3 mm) tworzą strumień sortymentu handlowego o nazwie *mieszanka*. Wreszcie odpady wzbogacalników *DISA 1*, *DISA 2* i hydrocyklonu tworzą strumień wyjściowy o nazwie *odpady*.

Analiza pracy struktur technologicznych (ZPMW) przy stałych parametrach rozdziału maszyn przeróbczych (gęstości rozdziału maszyn wzbogacających, wymiary oczek sit przesiewaczy, współczynnik rozdziału rozdzielacza strumienia węgla) była już omawiana np. w [4-11]. Są tam rozpatrzone analizy symulacyjne zarówno w warunkach stałych, jak i zmiennych charakterystyk ilościowo - jakościowych nadawy.

3. Analiza pracy maszyn przeróbczych (zpmw) przy zmiennych parametrach rozdziału

Obliczenia symulacyjne wychodów i parametrów jakościowych wszystkich produktów procesów przeróbczych ZPMW (rys. 1) zostały przeprowadzone we wszystkich poniższych przykładach dla węgla surowego (nadawy), sklasyfikowanego w 8. klasach ziarnowych o wymiarach od 0 do 200 mm, którego analiza sitowa jest przedstawiona w tablicy 1, natomiast uśrednione (bez podziału na klasy ziarnowe) wartości wychodów i parametrów jakościowych w 10. frakcjach gęstościowych o gęstościach od 1.20 do 2.20 g/cm^3 przedstawione są w tablicy 2. Z analizy sitowej i densymetrycznej wynika, że stosunkowo dużo jest w nadawie drobnych ziarn surowca (klasa ziarnowa o wymiarach od 0.5 do 10 mm ma największy wychód) oraz że surowiec wejściowy jest dość trudno wzbogacalny ze względu na stosunkowo duży udział pośrednich frakcji gęstościowych.

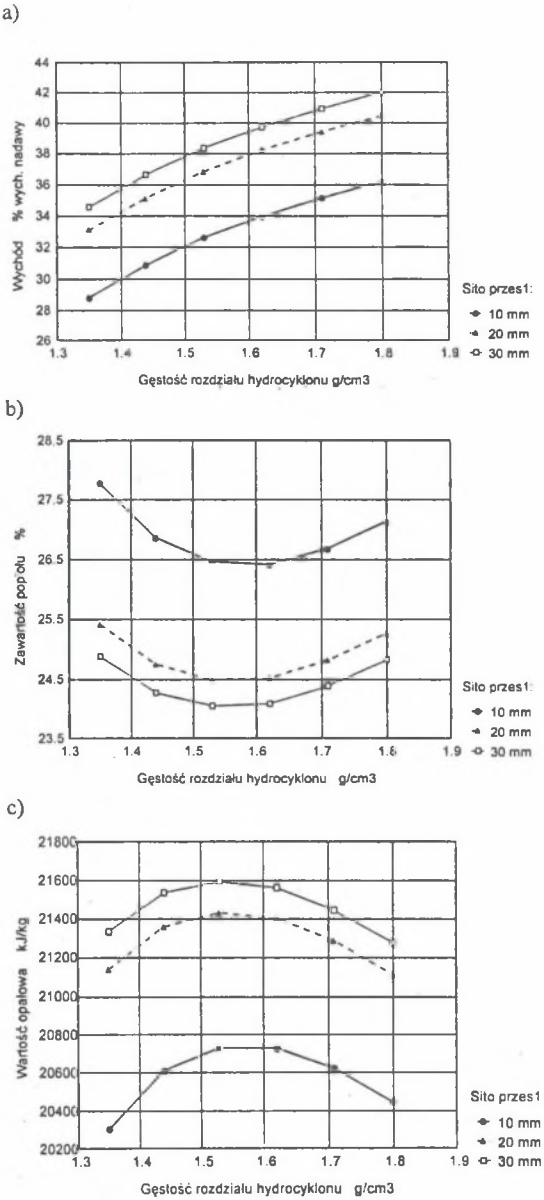
Tablica 1

Numer klasy ziarnowej	Wymiar klasy ziarnowej mm	Wychód kl. ziarn. %
1	200 - 80	9.23
2	80 - 60	5.65
3	60 - 40	10.63
4	40 - 30	6.21
5	30 - 20	8.84
6	20 - 10	17.14
7	10 - 0.5	31.28
8	0.5 - 0	11.02

Tablica 2

Numer frakcji gęstościowej	Gęstość frakcji g/cm^3	Wychód frakcji %	Popiół %	Siarka całkowita %
1	1.20 - 1.30	8.81	5.10	0.90
2	1.30 - 1.35	14.82	7.72	0.92
3	1.35 - 1.40	10.98	12.11	1.00
4	1.40 - 1.50	9.26	19.57	1.02
5	1.50 - 1.60	9.28	28.85	1.06
6	1.60 - 1.70	8.02	38.18	1.04
7	1.70 - 1.80	5.26	45.69	1.03
8	1.80 - 1.90	4.01	52.23	1.07
9	1.90 - 2.00	2.46	58.69	1.19
10	2.00 - 2.20	27.11	76.82	1.80

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych, pracę badanej struktury technologicznej ZPMW można scharakteryzować w następujący sposób. W rezultacie procesów wzbogacania w strumieniu wyjściowym - sortymencie handlowym *konc 1* znajdują się ziarna o wymiarach największych i frakcjach gęstościowych najlżejszych, w strumieniu wyjściowym *konc 2* znajdują się ziarna o wymiarach większych od 8 mm i frakcjach gęstościowych najlżejszych i pośrednich, w strumieniu wyjściowym *mieszanka* znajdują się zasadniczo ziarna najmniejsze pozbawione w znacznym stopniu ziarn o frakcjach gęstościowych najcięższych. Strumień wyjściowy o nazwie *odpady* zawiera ziarna o frakcjach najcięższych, oczywiście z pewnymi stratami części palnych, czyli ziarn o frakcjach lżejszych. Analiza densymetryczna



Rys.2. Wpływ jednoczesnych zmian dwóch parametrów rozdziału: oczka pierwszego sita przesiewacza *przes 1* i umownej gęstości rozdziału hydrocyklonu na wielkość wychodu (a), zawartość popiołu (b) i wartość opałową (c) sortymentu handlowego *mieszanka*

Fig.2. The influence of simultaneous changes of two parameters: the screen mesh and the separation density in a hydrocyclone on the: (a) yield, (b) ash content and (c) calorific value of the blend

prognoz wychodów strumieni wyjściowych przy stałych parametrach rozdziału maszyn przeróbczych podobnego schematu technologicznego jest przedstawiona w [5, 6, 11].

Jakiekolwiek zmiany wartości parametrów rozdziału maszyn przeróbczych (gęstości rozdziału wzbogacalników, wymiaru oczek sit przesiewaczy, współczynników rozdziału rozdzielaczy strumieni węgla), które to zmiany można bardzo łatwo wprowadzić - prowadzą do uzyskania odmiennych wyników. Zmiany parametrów rozdziału maszyn przeróbczych wpływają na zmiany zakresu wzbogacania węgla. Przykłady wpływu zmian parametrów rozdziału na wartości wychodów i zawartości parametrów jakościowych poszczególnych produktów maszyn przeróbczych zostały omówione w [2, 11].

W omawianym programie symulacyjnym możliwe jest prześledzenie wpływu zmian wartości dowolnego parametru rozdziału na wartości wychodów i zawartości parametrów jakościowych dowolnych strumieni schematu technologicznego. Dostępne są również analizy takiego wpływu przy jednoczesnych zmianach wartości dwóch dowolnych parametrów rozdziału.

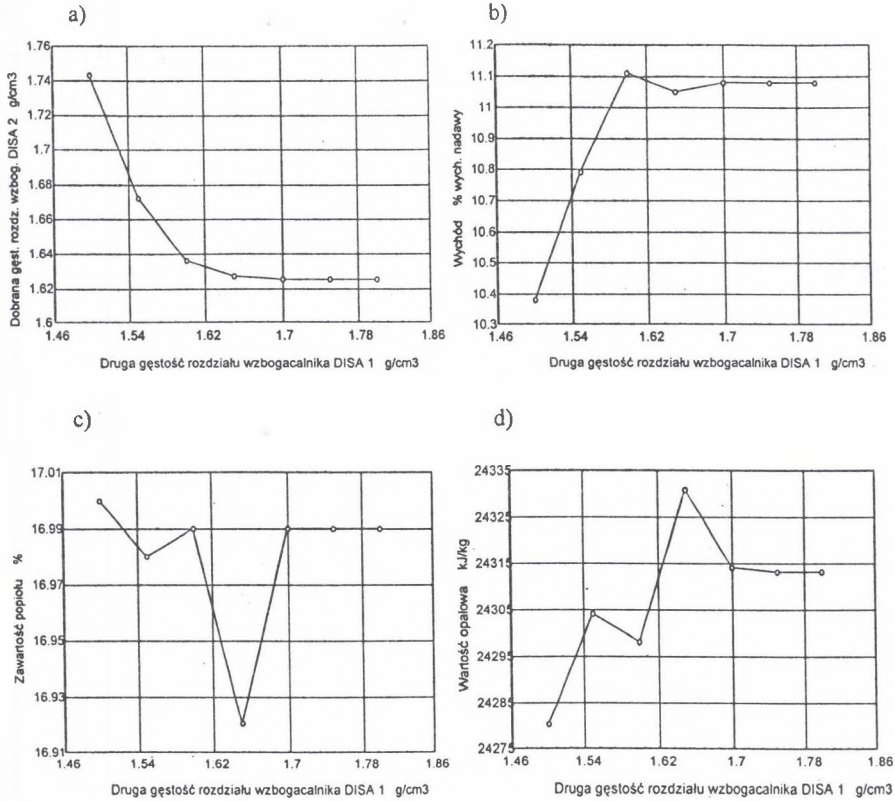
Dla celów demonstracji wyników obliczeń symulacyjnych przy jednoczesnych zmianach wartości dwóch parametrów rozdziału maszyn przeróbczych wybrano analizę zmian wychodu, zawartości popiołu i wartości opałowej sortymentu handlowego - strumienia *mieszanka*. Zmiennymi parametrami rozdziału były w tym przykładzie: wymiar oczka pierwszego sita przesiewacza *przes 1* (10, 20 i 30 mm) i (umowna) gęstość rozdziału hydrocyklonu (przedział zmienności 1.35 - 1.80 g/cm^3). Efekty obliczeń symulacyjnych są zobrazowane na rys.2, z którego można np. odczytać możliwe do uzyskania przy odpowiednim sterowaniu obiektu (obiektów) wartości ekstremalne wychodu bądź zawartości parametru jakościowego.

4. Dobór parametru rozdziału wybranej maszyny przeróbczej

W modelu symulacyjnym możliwe jest rozpatrywanie takich przypadków sterowania, w których niezależne są zmiany wartości parametru rozdziału jednej maszyny przeróbczej, a poprzez odpowiedni dobór wartości parametru rozdziału innej maszyny stabilizuje się wartość żądanego parametru jakościowego (lub wychodu) wybranego strumienia schematu technologicznego.

Poniżej przedstawione są przykładowe efekty symulacyjnego doboru wartości gęstości rozdziału wzbogacalnika *DISA 2* przy niezależnych zmianach drugiej gęstości rozdziału wzbogacalnika *DISA 1* i założonej w przedziale 16.8 - 17.0 % zawartości popiołu strumienia wyj-

ściowego - sortymentu handlowego *konc 2*. Założone niezależne zmiany wartości drugiej gęstości rozdziału wzbogacalnika *DISA 1* zawierały się w przedziale 1.50 - 1.80 g/cm^3, a dopuszczalny zakres zmian dobieranych wartości gęstości rozdziału wzbogacalnika *DISA 2* wynosił również 1.50 - 1.80 g/cm^3. Na rys.3 pokazana jest charakterystyka zmian dobieranych wartości gęstości rozdziału wzbogacalnika *DISA 2*.(a), charakterystyki zmian wartości wychodów (b), założonej zawartości popiołu i wartości opałowej sortymentu handlowego *konc 2* Analogiczne charakterystyki innych strumieni wyjściowych schematu zostały zamieszczone w [11]. Przykłady innych tego typu doborów wartości parametrów rozdziału zostały zamieszczone w [9].



Rys.3. Zależność dobranych wartości gęstości rozdziału wzbogacalnika *DISA 2* od zmian drugiej gęstości rozdziału wzbogacalnika *DISA 1* (a), zmiany wartości wychodu sortymentu *konc 2* (b), założonej zawartości popiołu (c) i wartości opałowej (d)

Fig.3. The dependence between the separation density of the *DISA 2* washer and the separation density of the *DISA 1* washer (a), changes of the concentrate yield *conc2* (b), ash content (c) and calorific value (d)

5. Optymalny dobór parametrów rozdziału maszyn przeróbczych

Zagadnienia optymalnego doboru parametrów rozdziału maszyn przeróbczych są nadal zagadnieniami stosunkowo nowymi w przypadku zastosowań praktycznych, nabierają jednak coraz większego znaczenia dla optymalnego wykorzystania wzbogacanego węgla surowego.

Opracowany model symulacyjny zawiera algorytmy optymalnego symulacyjnego doboru wartości parametrów rozdziału maszyn przeróbczych. Jako kryterium optymalizacji przyjęto tu uzyskanie maksymalnej produkcji o zadanej zawartości wybranego parametru jakościowego dowolnego strumienia schematu technologicznego. Algorytm ten uwzględnia dobór od 1. do 8. parametrów rozdziału o wartościach zawierających się w żądanych dopuszczalnych przedziałach wartości. Tak samo uwzględnia on określony przedział wartości zadanej zawartości wybranego parametru jakościowego. Wartość produkcji jest obliczana dla dowolnie wybranych strumieni sortymentów (wykorzystywane są tutaj odpowiednie cenniki węgla, które są automatycznie przeszukiwane), jak również strumieni odpadów (uwzględnia się wtedy odpowiednie wartości kosztów składowania odpadów). Algorytm ten jest oparty na metodzie optymalizacyjnej Hooke'a - Jeevsa.

W rozpatrzonych dwóch przykładach optymalnego symulacyjnego doboru wartości parametrów rozdziału maszyn przeróbczych przyjęto, że będzie się zawierała w żądanych granicach zawartość popiołu sortymentu handlowego *konc 2* (przykład 1), albo wartość opałowa sortymentu handlowego *mieszanka* (przykład 2). W obu przykładach do obliczania wartości produkcji uwzględnione zostały parametry ilościowo - jakościowe wszystkich strumieni wyjściowych rozpatrywanej struktury technologicznej: 3. strumieni sortymentów handlowych: *konc 1*, *konc 2* i *mieszanka*, oraz 1. strumienia odpadów - *odpady*.

W pierwszym przykładzie przyjęto, że zawartość popiołu sortymentu handlowego *konc 2* ma się zawierać w granicach 17.0 - 18.0% (granice odpowiedniej klasy cennikowej sortymentu). Optymalny dobór wartości wszystkich 8. parametrów rozdziału pozwala na postawienie wniosku o wzroście wartości produkcji o 7.4%, przy czym obliczona zawartość popiołu sortymentu handlowego *konc 2* jest równa 18.0%. W tablicy 3. zawarte jest zestawienie optymalnie dobranych wartości parametrów rozdziału według żądanego kryterium ich doboru.

Tablica 3

Parametr rozdziału	Wart. par. rozdz. jak na rys.1	Optymalne wart. par. rozdz.
DISA 1 1 gęst. rozdz.	1.500 g/cm^3	1.576 g/cm^3
DISA 1 2 gęst. rozdz.	1.700 g/cm^3	1.778 g/cm^3
DISA 2 gęst. rozdz.	1.650 g/cm^3	1.663 g/cm^3
hydrocyklon gęst. rozdz.	1.550 g/cm^3	1.794 g/cm^3
przes 1 wym. oczko 1 sita	20.0 mm	29.6 mm
przes 1 wym. oczko 2 sita	8.0 mm	8.1 mm
przes 3 wym. oczko sita	3.0 mm	3.1 mm
rozdzielacz wsp. rozdz.: *konc dis 2 - konc 2*	50.0 %	60.5 %

Drugi przykład dotyczy sytuacji, w której przyjęto, że wartość opałowa sortymentu handlowego *mieszanka* ma się zawierać w granicach 20 010 - 20 050kJ/kg (wartości zbliżone do dolnej wartości granicznej odpowiedniej klasy cennikowej węgla). Przewidywany w tym przykładzie wzrost wartości produkcji wynosi 39.8%, przy wartości opałowej sortymentu handlowego *mieszanka* równej 20 021kJ/kg. Dobrane symulacyjnie optymalne wartości parametrów rozdziału przedstawione są w tablicy 4.

Tablica 4

Parametr rozdziału	Wart. par. rozdz. jak na rys.1	Optymalne wart. par. rozdz.
DISA 1 1 gęst. rozdz.	1.500 g/cm^3	1.440 g/cm^3
DISA 1 2 gęst. rozdz.	1.700 g/cm^3	1.780 g/cm^3
DISA 2 gęst. rozdz.	1.650 g/cm^3	1.766 g/cm^3
hydrocyklon gęst. rozdz.	1.550 g/cm^3	1.859 g/cm^3
przes 1 wym. oczko 1 sita	20.0 mm	27.1 mm
przes 1 wym. oczko 2 sita	8.0 mm	9.7 mm
przes 3 wym. oczko sita	3.0 mm	5.0 mm
rozdzielacz wsp. rozdz.: *konc dis 2 - konc 2*	50.0 %	63.5 %

Z rozpatrzonych przypadków wynika stosunkowo znaczny wzrost wartości produkcji przy symulacyjnie dobranych wartościach parametrów rozdziału maszyn przeróbczych. Wzrost ten wynika z tego, że parametry jakościowe sortymentów handlowych przyjmują wtedy wartości zbliżone do wartości granicznych w odpowiednich klasach cennikowych węgla, a równocześnie zmieniają się wartości wychodów sortymentów handlowych i odpadów. Oczywiście przy forsowaniu żądanych wartości parametrów jakościowych sortymentów handlowych nieodpowiednich dla danej struktury technologicznej i charakterystyki ilościowo - jakościowej nadawy dochodzi do zmniejszenia wartości produkcji ZPMW.

W przypadkach gdy nie uwzględnia się wartości produkcji całego ZPMW, można obliczać wartość produkcji tylko jednego [11], bądź też kilku (maksymalnie 6.) sortymentów handlowych. Możliwy jest też przypadek uwzględniania w obliczeniach tylko strumieni odpadów, w celu np. minimalizacji kosztów ich składowania.

Podsumowując, należy zwrócić uwagę na dużą elastyczność opracowanego programu symulacyjnego, zwłaszcza w przypadkach obliczeń symulacyjnych przy zmiennych i dobieranych wartościach parametrów rozdziału. Możliwe jest bowiem dokonywanie wielowariantowych analiz symulacyjnych przy zmianach wartości różnych, dowolnie wybranych parametrów rozdziału.

Komputerowy program symulacyjny procesów przeróbki mechanicznej węgla umożliwia dokonywanie dogodnych analiz układów technologicznych dla zmiennych charakterystyk ilościowo - jakościowych nadawy, przy dowolnie wybranych i zmienianych parametrach rozdziału maszyn przeróbczych (wymiary oczek przesiewaczy, gęstości rozdziału we wzbogacalnikach, osadzarkach i hydrocyklonach, współczynniki rozdziału w rozdzielaczach strumieni). Zaletą jest też możliwość badania skomplikowanych układów technologicznych produkcji mieszanek węgla, z uwzględnieniem zadania stabilizacji jakości produktów oraz maksymalizacji ich wychodów w warunkach zmienności parametrów nadawy.

LITERATURA

1. *Cierpisz S.*: Automatyzacja procesów przeróbki mechanicznej węgla. Wyd. Śląsk, Katowice 1980.
2. *Cierpisz S., Cieślak W., Pielot J.*: Komputerowy model symulacyjny procesów przeróbki mechanicznej węgla. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1994, nr 12 (294).

3. *Cierpisz S., Pielot J.*: Model symulacyjny układu technologicznego zakładu przeróbki mechanicznej węgla. Prace KEiAG, Gliwice 1994 (BK - 57/RG - 1/94/7).
4. *Cierpisz S., Cieślak W., Pielot J.*: Analiza symulacyjna efektów wzbogacania w układach stabilizacji gęstości cieczy ciężkiej. Materiały Konferencji: Automatyzacja Procesów Przeróbki Mechanicznej Węgla (Min - TECH), Szczyrk 1995.
5. *Cierpisz S., Pielot J.*: Symulacyjne badania procesów wzbogacania węgla w warunkach zmienności parametrów nadawy. Materiały Konferencji ICAMC, Gliwice 1995.
6. *Cierpisz S., Pielot J.*: Analiza odpadów w procesach przeróbki mechanicznej węgla z zastosowaniem symulacji komputerowej. Materiały Międzynarodowej Konferencji Przeróbki Kopalin i Gospodarki Odpadami w Aspekcie Ochrony Środowiska, Szczyrk 1995.
7. *Cierpisz S., Cieślak W., Pielot J.*: Analiza układów technologicznych zakładów przeróbki węgla z zastosowaniem komputerowego modelu symulacyjnego. Materiały I Międzynarodowej Konferencji Przeróbki Kopalin, Kraków 1995.
8. *Cierpisz S., Pielot J.*: Określenie efektów ekonomicznych układów sterowania w cieczach ciężkich. Prace KEiAG, Gliwice 1995 (BK - 253/RG1/95/I d).
9. *Cierpisz S., Pielot J.*: Wpływ parametrów rozdziału na produkcję mieszanki węgla. Materiały Konferencji: Automatyzacja Procesów Przeróbki Mechanicznej Węgla (Min - TECH), Szczyrk 1996.
10. *Cierpisz S., Pielot J.*: Analiza procesów przeróbki mechanicznej węgla z zastosowaniem symulacji komputerowej. (Artykuł zgłoszony na krajową konferencję PCAMC 1996).
11. *Cierpisz S., Pielot J.*: Symulacyjne badania układów sterowania procesów przeróbki mechanicznej węgla. Badania symulacyjne wybranych obiektów. Sprawozdania merytoryczne z projektu badawczego KBN 9T/12A 03008, Gliwice 1996.
12. *Goodman F., McCreery J.*: Coal Preparation Computer Model. Vol I Environmental Protection Agency, Washington 1980.
13. *Kalinowski K., Walaszek - Babiszewska A.*: Sterowanie procesu wzbogacania węgla kamiennego. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 1983.

Recenzent: Dr inż. Kazimierz Trybalski

Wpłynęło do Redakcji 29.09.1996 r.

Abstract

Computer simulation models are an effective tool for the analysis and design of control systems for coal preparation processes which consist of several unit operations (washers, screens, mixers and stream splitters). These models allow for multi - variant analysis of the processes. The application of computer simulation for a given technological process have been presented in the paper. The simulation has been performed for two separation parameters which have been simultaneously changed. Changes of yields, ash contents and calorific value of products as a result of changes of separation parameters have been also presented.

The control system for stabilization of product quality consisting of two components from different washers has been analysed. The computer simulation model contains algorithms for optimal choice of parameters of coal preparation machines. The criterion for optimization chosen for this simulation was maximum yield at desired ash content in the particular product . The value (price) of the production is calculated in the model for a chosen concentrate or waste. Two examples of optimization of technological schemes have been presented in the paper.