

*Joachim Pielot**

OCENA EFEKTYWNOŚCI WZBOGACANIA WĘGLA ENERGETYCZNEGO W CYKLONACH WZBOGACAJĄCYCH Z RECYRKULACJĄ PRODUKTU PRZEJŚCIOWEGO

1. Wstęp

W zakładach przeróbki węgla zmiany założeń produkcyjnych (wynikające z konieczności realizacji kontraktów handlowych) oraz różnorakie zakłócenia procesów produkcyjnych prowadzą do uzyskiwania różnych punktów pracy struktury technologicznej zakładu przeróbki węgla, będącego złożonym układem sterowania ekstremalnego [3, 4, 6, 11, 13, 15]. Optymalne decyzje sterujące, maksymalizujące oczekiwane efekty sterowania nadrzędnego, np. uzyskania maksymalnej wartości produkcji o zadanej jakości, można rozwiązywać z wykorzystaniem optymalizacji statycznej [4, 6, 13].

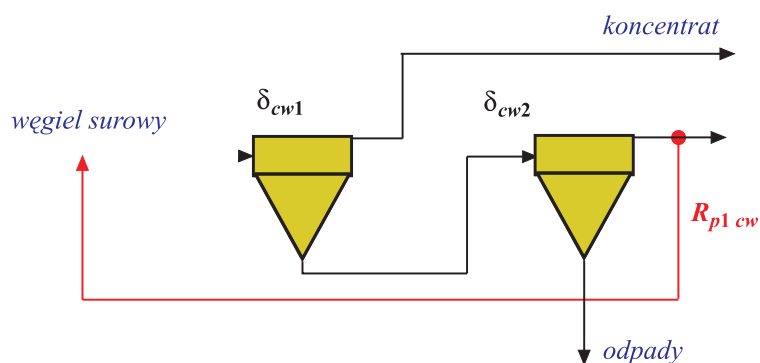
Zmieniając parametry rozdziału operacji przerobczych można sterować przebiegiem procesów przeróbki węgla. Odpowiedni dobór wartości tych parametrów pozwala na uzyskanie określonych cech produktów oraz maksymalnej wartości produkcji [6, 8, 13]. W procesach flotacji rud metali dodatkowo stosuje się ponowne wzbogacanie części produktów [18], czyli recykulację produktów. Również w przypadku flotacji węgla możliwe jest uzyskanie lepszych wyników wzbogacania, poprzez zastosowanie recykulacji produktów [9].

W przedstawionym referacie rozpatrzone zostały zagadnienia sterowania dotyczące fragmentu układu technologicznego, mianowicie wzbogacania węgla energetycznego w cyklonach wodnych i cyklonach cieczy ciężkiej z recykulacją strumieni produktu pośredniego. Wyznaczone zostały optymalne wartości gęstości rozdziału w cyklonach przy różnych założeniach produkcyjnych co do jakości koncentratu. W opracowaniu podane zostały efekty ekonomiczne, w postaci względnej wartości produkcji, uzyskiwane przy dwóch różnych sposobach recykulacji strumienia produktu pośredniego z cyklonów. Analizy wzbogacania w złożonym układzie technologicznym z recykulacją strumieni produktów podane zostały w monografii [5] i referacie [16].

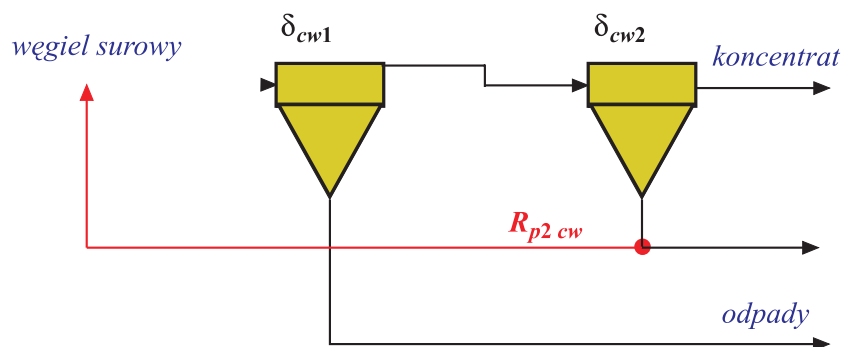
* Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice

2. Rozpatrywany układ technologiczny wzbogacania węgla w dwóch cyklonach

Na rysunkach 1 i 2 pokazane są dwie wersje schematu układu technologicznego z recyrkulacją części strumienia produktu pośredniego (półproduktu) z dwóch cyklonów wodnych dwuproduktowych. Gęstości rozdziału w obu cyklonach są oznaczone jako: δ_{cw1} i δ_{cw2} . Współczynniki $R_{p1\ cw}$ i $R_{p2\ cw}$ są współczynnikami recyrkulacji półproduktu. Identyczne schematy dotyczą wzbogacania w cyklonach cieczy ciężkiej — wtedy odpowiednio parametry rozdziału oznaczane są symbolami: δ_{cc1} , δ_{cc2} , $R_{p1\ cc}$ i $R_{p2\ cc}$.



Rys. 1. Schemat układu technologicznego z recyrkulacją części półproduktu z cyklonów wodnych (wersja 1)



Rys. 2. Schemat układu technologicznego z recyrkulacją części półproduktu z cyklonów wodnych (wersja 2)

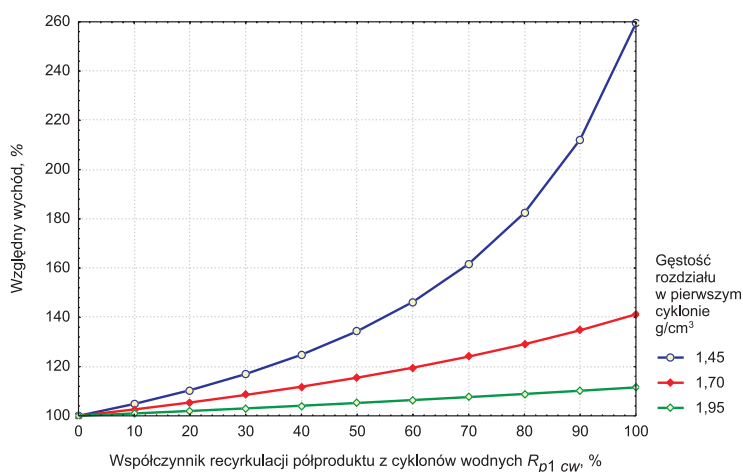
We wszystkich prognozach symulacyjnych uwzględniona została nadawa węgla surowego trudno wzbogacalnego. Wymiary ziarn tego węgla zawierają się w przedziale $8 \div 0,5$ mm, a charakterystyka gęstościowo-jakościowa podana została w tabeli 1.

TABELA 1

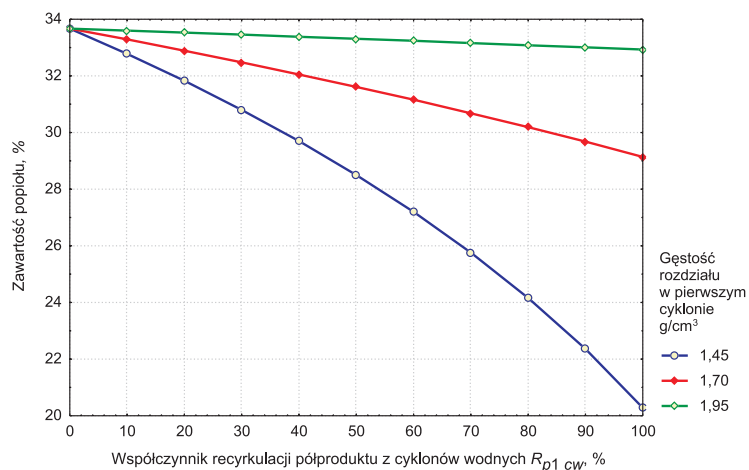
Charakterystyka gęstościowo-jakościowa węgla surowego (klasa ziarnowa 8+0,5 mm)

Gęstość frakcji, g/cm ³	Wychód frakcji, %	Zawartość popiołu, %	Zawartość siarki całkowitej, %	Wartość opałowa, kJ/kg
< 1,30	12,14	4,67	0,84	30 680
1,30÷1,35	17,97	7,40	0,86	29 630
1,35÷1,40	10,95	10,99	0,97	28 300
1,40÷1,50	8,47	17,92	1,10	25 750
1,50÷1,60	7,42	26,61	1,24	22 550
1,60÷1,70	7,02	35,81	1,25	19 160
1,70÷1,80	3,95	43,81	1,13	16 220
1,80÷1,90	4,04	51,03	1,12	13 560
1,90÷2,00	2,59	57,08	1,39	11 330
> 2,00	25,45	75,84	2,75	4 420
Razem	100,00	33,67	1,46	19 960

Na rysunkach 3 i 4 zilustrowane są zmiany wychodu nadawy oraz zawartości popiołu w nadawie do cyklonów wodnych — z uwzględnieniem recyrkulacji strumienia półproduktu — w układzie jak na rysunku 1 przy zmianach współczynnika recyrkulacji $R_{p1\text{ cw}}$. Wyniki prognoz symulacyjnych uzyskane zostały przy stałej gęstości rozdziału w drugim cyklonie równej 1,950 g/cm³.

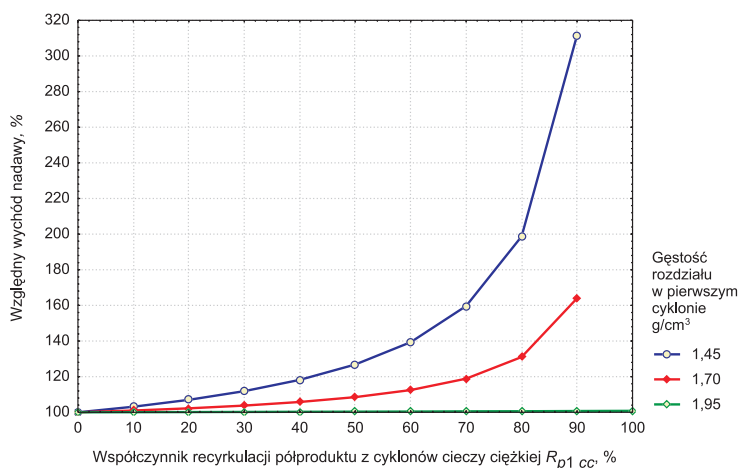


Rys. 3. Względny wychód nadawy do cyklonów wodnych przy zmianach współczynnika recyrkulacji półproduktu $R_{p1\text{ cw}}$

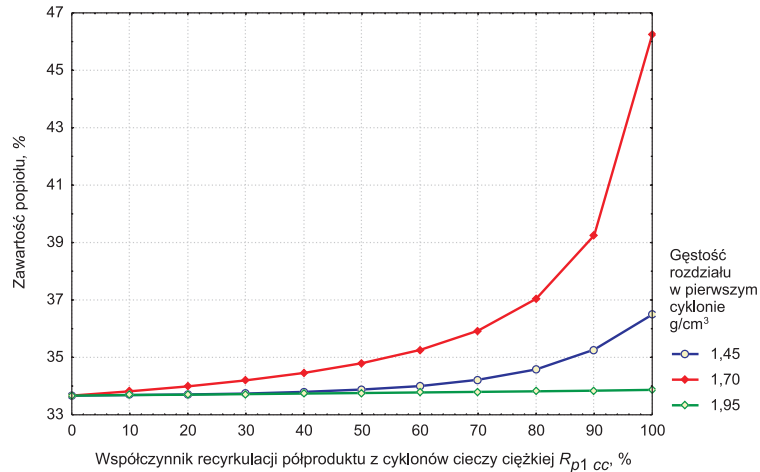


Rys. 4. Zawartość popiołu w nadawie do cyklonów wodnych przy zmianach współczynnika recyrkulacji półproduktu $R_{p1\ cw}$

Zależności wychodów i zawartości popiołu w przypadku zmian współczynnika recyrkulacji $R_{p2\ cw}$ (w układzie jak na rys. 2) nie zostały tu przedstawione, gdyż są niemal identyczne gdy stała jest gęstość rozdziálu w pierwszym cyklonie — 1,950 g/cm³, a w drugim cyklonie gęstość rozdziálu przyjmuje wartości 1,450, 1,700 oraz 1,950 g/cm³. Rysunki 5 i 6 ilustrują analogiczne zmiany wychodu i zawartości popiołu w nadawie do cyklonów cieczy ciężkiej, w układzie jak na rysunku 1 przy zmianach współczynnika recyrkulacji $R_{p1\ cc}$. Również tutaj wyniki prognoz uzyskane zostały przy stałej gęstości rozdziálu w drugim cyklonie równej 1,950 g/cm³.



Rys. 5. Względny wychód nadawy do cyklonów cieczy ciężkiej przy zmianach współczynnika recyrkulacji półproduktu $R_{p1\ cc}$



Rys. 6. Zawartość popiołu w nadawie do cyklonów cieczy ciężkiej przy zmianach współczynnika recykulacji półproduktu R_{p1_cc}

Jak widać z rysunku 3 i 5, możliwy jest taki sposób sterowania pracą układu, aby ilość nadawy nie rosła w znaczący sposób, jak to ma miejsce w przypadku recykulacji koncentratu albo odpadów z operacji przerobczych [5, 10, 16]. Wzrost ilości nadawy (niebezpieczny zwłaszcza we wzbogacalnikach o bardzo dobrym kształcie krzywych rozdziálu, a więc w cyklonach cieczy ciężkiej) może być praktycznie nieistotny przy takim sterowaniu, przy którym gęstości rozdziálu obydwu cyklonów różnią się od siebie nieznacznie.

2. Optymalizacja produkcji przy recykulacji półproduktu z cyklonów

Do obliczeń optymalizacyjnych wykorzystany został algorytm maksymalizacji produkcji o zadanej jakości produkcji, omówiony w pracach [2, 6, 13], wykorzystujący modele tablicowe operacji przeróbki węgla [7]. Do obliczania wartości produkcji wykorzystana została czwarta wersja formuły sprzedażnej z 2002 roku [1, 12].

Kryterium I

Dla obydwóch wersji ponownego wzbogacania półproduktu (rys. 1 i 2) wartość produkcji (Wp), która jest funkcją celu algorytm maksymalizacji, określono najpierw zależnością

$$Wp(\delta_{cw1}, \delta_{cw2}, R_{p_cw}) = \Gamma_k * C_{jk} + \Gamma_p * C_{jp} - \Gamma_o * Kso \quad (1)$$

w przypadku wzbogacania w cyklonach wodnych, albo:

$$Wp(\delta_{cc1}, \delta_{cc2}, R_{pcc}) = \Gamma_k * C_{jk} + \Gamma_p * C_{jp} - \Gamma_o * Kso \quad (2)$$

w przypadku wzbogacania w cyklonach cieczy ciężkiej,

gdzie:

$\delta_{cw1}, \delta_{cw2}$ — gęstości rozdziału w cyklonach wodnych,

$\delta_{cc1}, \delta_{cc2}$ — gęstości rozdziału w cyklonach cieczy ciężkiej,

R_{pcw} — współczynnik recyrkulacji części półproduktu z cyklonów wodnych R_{p1cw} albo R_{p2cw} ,

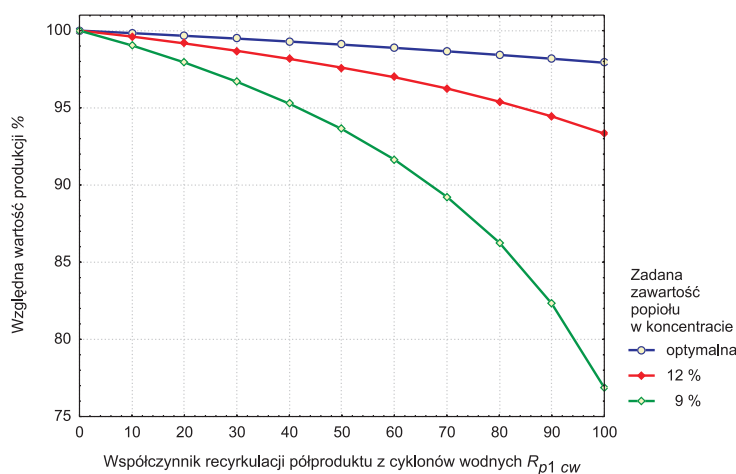
R_{pcc} — współczynnik recyrkulacji części półproduktu z cyklonów cieczy ciężkiej R_{p1cc} albo R_{p2cc} ,

$\Gamma_k, \Gamma_p, \Gamma_o$ — wychody koncentratu, półproduktu i odpadów,

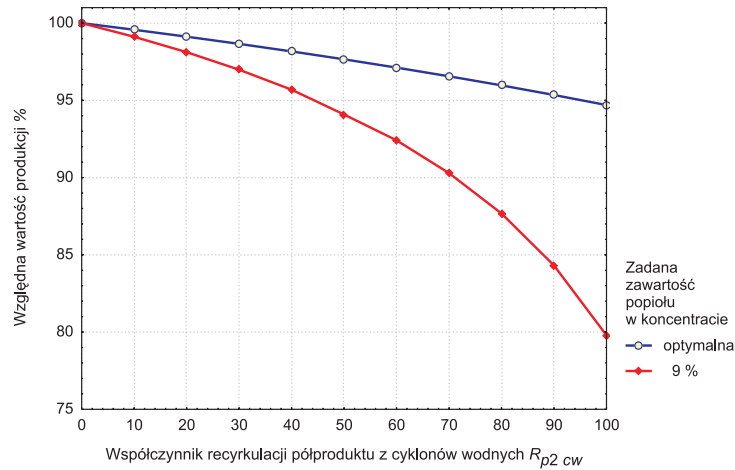
C_{jk}, C_{jp} — ceny jednostkowe koncentratu i półproduktu,

Kso — koszty składowania odpadów.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono uzyskane wyniki względnej maksymalnej wartości produkcji z cyklonów wodnych, uzyskanej przy optymalnych wartościach gęstości rozdziału. Każdorazowo poziomem odniesienia wartości produkcji była jej maksymalna wartość przy zerowych współczynnikach recyrkulacji, czyli przy wzbogacaniu bez recyrkulacji półproduktu. Przy wzroście współczynnika recyrkulacji półproduktu i uwzględnianym kryterium maksymalizacji funkcji celu (1) wartość produkcji zawsze maleje. Wynika to z faktu, że rośnie wtedy wychów odpadów, w wyniku czego wartość produkcji koncentratu i półproduktu maleje. Nie ma tutaj znaczenia w jaki sposób kształtują się wzajemne relacje między ilością i jakością koncentratu i półproduktu, gdyż formuła sprzedażna jest liniowa dla zmian zawartości popiołu i wartości opałowej [15, 16].



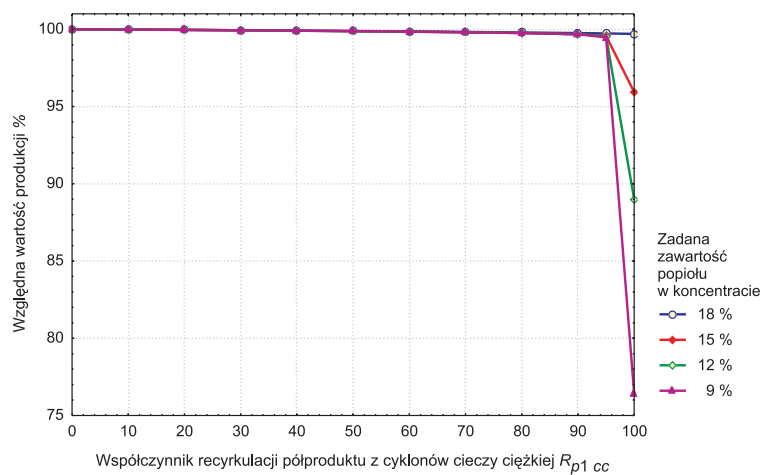
Rys. 7. Względna wartość produkcji z cyklonów wodnych przy zmianach współczynnika recyrkulacji półproduktu R_{p1cw}



Rys. 8. Względna wartość produkcji z cyklonów wodnych przy zmianach współczynnika recykulacji półproduktu $R_{p2\ cw}$

Optymalne zawartości popiołu w koncentracie (przy których uzyskiwana jest maksymalna wartość produkcji) zawierają się w granicach od 13,42% (przy $R_{p1\ cw} = 0\%$) do 14,00% (przy $R_{p1\ cw} = 100\%$) albo od 10,51% (przy $R_{p2\ cw} = 0\%$) do 11,00% (przy $R_{p2\ cw} = 100\%$).

Na rysunku 9 pokazane zostały odpowiednie zmiany względnej maksymalnej wartości produkcji z cyklonów cieczy ciężkiej, uzyskane w układzie jak na rysunku 1, z uwzględnieniem kryterium maksymalizacji funkcji celu (2). Wyniki uzyskane w układzie jak na rysunku 2 są bardzo podobne.



Rys. 9. Względna wartość produkcji z cyklonów cieczy ciężkiej przy zmianach współczynnika recykulacji półproduktu $R_{p1\ cc}$

Kryterium II

W drugim przypadku, jako funkcję celu algorytmu maksymalizacji wartości produkcji przyjęto wartość produkcji samego koncentratu. Odpowiednio w przypadku cyklonów wodnych i cyklonów cieczy ciężkiej kryterium to przyjmuje postać:

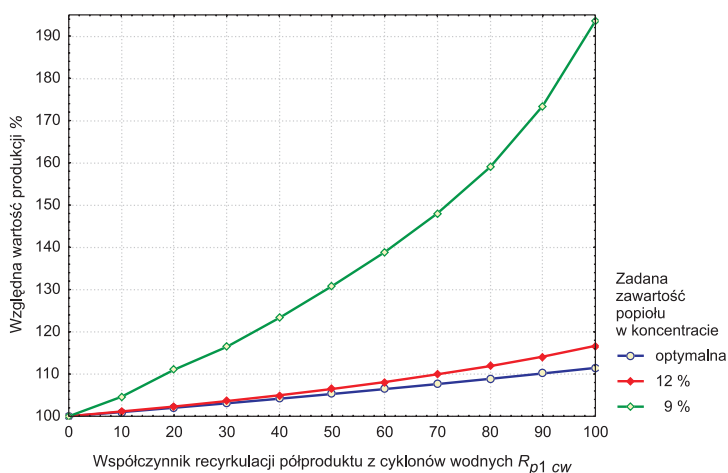
$$Wp(\delta_{cw1}, \delta_{cw2}, R_{p\ cw}) = \Gamma_k * C_{jk} \quad (3)$$

$$Wp(\delta_{cc1}, \delta_{cc2}, R_{p\ cc}) = \Gamma_k * C_{jk} \quad (4)$$

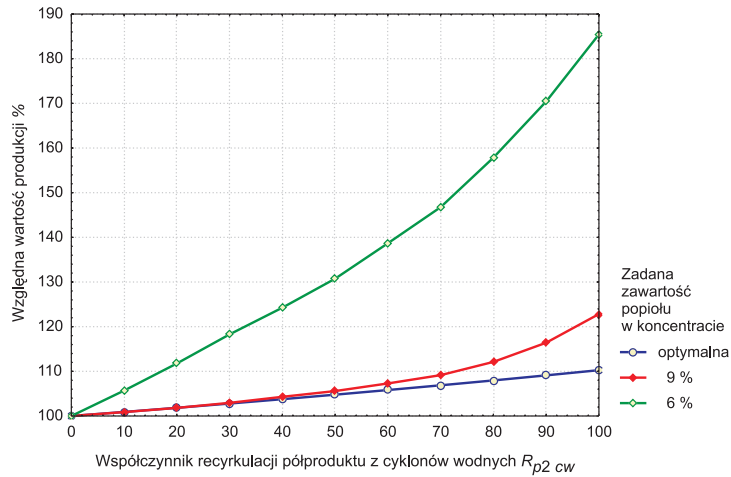
Rysunki 10 i 11 ilustrują uzyskane zależności względnej maksymalnej wartości produkcji koncentratu z cyklonów wodnych. Przy wzroście współczynnika recyrkulacji półproduktu i uwzględnianym kryterium maksymalizacji funkcji celu (3) wartość produkcji rośnie, zwłaszcza przy mniejszej założonej zawartości popiołu w koncentracie. Odpowiada to analogicznemu wzrostowi wartości produkcji przy recyrkulacji koncentratu [5, 10]. Zaleta recyrkulacji półproduktu polega na tym, że ilość nadawy nie rośnie tak znacząco.

Na rysunku 12 pokazany jest możliwy do uzyskania wzrost wartości produkcji z cyklonów cieczy ciężkiej, dotyczący układu jak na rysunku 1.

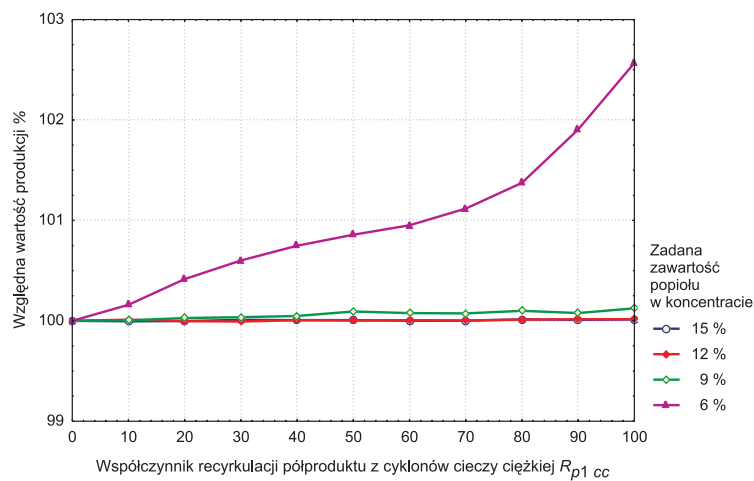
Wyniki uzyskane w układzie jak na rysunku 2 są podobne, jednak maksymalny przyrost wartości produkcji przy założonej zawartości popiołu w koncentracie równej 6% wynosi tylko 0,7%.



Rys. 10. Względna wartość koncentratu z cyklonów wodnych przy zmianach współczynnika recyrkulacji półproduktu $R_{p1\ cw}$



Rys. 11. Względna wartość koncentratu z cyklonów wodnych przy zmianach współczynnika recykulacji półproduktu $R_{p2\ cw}$



Rys. 12. Względna wartość koncentratu z cyklonów cieczy ciężkiej przy zmianach współczynnika recykulacji półproduktu $R_{p1\ cc}$

3. Wnioski

- 1) Krzywe rozdziału wzbogacalników grawitacyjnych mają kształt odbiegający od idealnej krzywej, co powoduje, iż w procesie wzbogacania grawitacyjnego pojawiają się ziarna błędne — ziarna frakcji ciężkiej w koncentracie, zanieczyszczające go oraz ziarna frakcji lekkiej w odpadach, stanowiące straty węgla. Zastosowanie recykulacji koncen-

tratu pozwala na uzyskanie efektu równowaznego poprawie kształtu krzywych rozdziału — wynika to z analizy zmian wychodów produktów i zawartości popiołu, przy zmianach współczynnika recyrkulacji koncentratu [5, 17].

- 2) Stosowanie recyrkulacji produktów w pewnych przypadkach umożliwia wzrost wartości produkcji. Wzrost wartości produkcji uzyskuje się przy małej zadanej zawartości popiołu w koncentracie stosując ponowne wzbogacanie części koncentratu [5, 10, 16, 17] lub półproduktu (rys. 10–12). Przy dużej zadanej zawartości popiołu w koncentracie obserwowane jest zmniejszanie wartości produkcji wraz ze wzrostem współczynnika recyrkulacji koncentratu [5].
- 3) W przypadku recyrkulacji koncentratu albo odpadów w sposób, w przybliżeniu, wykładniczy rośnie ilość nadawy do wzbogacalników. Ten niekorzystny efekt możliwy jest całkowicie do pominięcia w przypadku recyrkulacji półproduktu, wtedy gdy gęstości rozdziału obydwu wzbogacalników nie różnią się znacząco między sobą. Zwłaszcza jest to istotne w przypadku wzbogacalników z cieczą ciężką — wzbogacalników o dobrym kształcie krzywych rozdziału.
- 4) Możliwa do uzyskania zawartość popiołu w koncentracie w układzie z rysunku 1 jest nieco większa niż w układzie z rysunku 2 (rys. 10 i 11). Przy zadanej zawartości popiołu w koncentracie równej np. 9% układem efektywniejszym jest układ z rysunku 1. Natomiast nie można w tym układzie uzyskać zawartości popiołu w koncentracie równej 6%, co z kolei jest możliwe w układzie z rysunku 2.
- 5) Wzrost wartości produkcji w przypadku cyklonów wodnych jest znacząco wyższy niż w przypadku cyklonów cieczy ciężkiej. Wynika to z kształtu krzywych rozdziału tych wzbogacalników. W cyklonach cieczy ciężkiej krzywa rozdziału jest kształtem zbliżona do krzywej idealnej, a zatem ilość ziarn błędnych jest minimalna. W cyklonach wodnych krzywe rozdziału mają kształt najbardziej odbiegający od krzywej idealnej (spośród wszystkich wzbogacalników grawitacyjnych), dlatego liczba ziarn błędnych jest duża, a ponowne ich wzbogacanie prowadzić może do znaczących efektów ekonomicznych.
- 6) Możliwy do uzyskania — oczywiście tylko w niektórych przypadkach założeń produkcyjnych — wzrost wartości produkcji jest wartością godną zainteresowania dla technologów w zakładach wzbogacania węgla. Może do przyczynić się poprawy poziomu efektywności dyspozytorskiego sterowania układów technologicznych przeróbki węgla.

LITERATURA

- [1] *Blaschke W., Grudziński Z., Lorenz U.*: Koncepcja formuły sprzedażnej węgla kamiennego energetycznego przeznaczonego dla energetyki zawodowej. *Inżynieria Mineralna*, 3(10), zeszyt specjalny, 2003, 185–193
- [2] *Cierpisz S., Pielot J.*: Metoda wyznaczania optymalnych wartości parametrów rozdziału procesów przerobczych. *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa*, 323, 6–7, 1997, 101–105
- [3] *Cierpisz S., Pielot J.*: Computer simulation of complex control systems in coal preparation plants. *Archives of Mining Sciences*, 44, 3, 1999, 387–394
- [4] *Cierpisz S., Pielot J.*: Komputerowy model symulacyjny procesów przeróbki węgla — zastosowanie w systemach dyspozytorskiego sterowania. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Wydawnictwo IGSMiE PAN*, 15, zeszyt specjalny, 1999, 265–282

- [5] *Cierpisz S., Kalinowski K., Kaula R., Pielot J.*: Sterowanie i optymalizacja produkcji grupy zakładów przeróbki węgla. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 107, 2006
- [6] *Cierpisz S., Pielot J.*: Symulacyjne statyczne modele procesów i układów sterowania w zakładach wzbogacania węgla. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 28, 2001
- [7] *Goodman F., McCreery J.*: Coal Preparation Computer Model. Vol. I. Washigton, U.S. Environmental Protection Agency 1980
- [8] *Kalinowski K.*: Identyfikacja i sterowanie procesami wzbogacania węgla we wzbogacalnikach z cieczą ciężką i w osadzarkach. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, 120, 1982
- [9] *Kalinowski K.*: The use of generalized characteristics of flotation systems in the problems of their optimization. Information Technologies and Systems, Lviv 2000, 77–84
- [10] *Kalinowski K., Pielot J.*: Analiza wzbogacania węgla w osadzarkach z recykulacją produktów. Mechanizacja i Automatyzaacja Górnictwa, 431, 12, 2006, 41–47
- [11] *Kaula R., Pielot J.*: Zagadnienia sterowania produkcją w układzie technologicznym procesów przeróbki węgla. Archives of Mining Sciences 50, 1, 2005, 69–100
- [12] *Lorenz U., Blaschke W., Grudziński Z.*: Propozycja nowej formuły sprzedażnej węgla energetycznego przeznaczonego dla energetyki zawodowej. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Studia, Rozprawy, Monografie nr 112, 2002
- [13] *Pielot J.*: Maksymalizacja produkcji w sterowaniu procesów przeróbki mechanicznej węgla. Materiały V Konferencji Automatyzaacji Procesów Przeróbki Mechanicznej Węgla, Szczyrk, 5–8 maja 1999, 145–158
- [14] *Pielot J.*: Porównanie efektów wzbogacania w układzie technologicznym przy różnych formułach sprzedażnych węgla. Mechanizacja i Automatyzaacja Górnictwa, 416, 9, 2005, 27–37
- [15] *Pielot J.*: Wartość produkcji węgla przy różnych parametrach odniesiona w formułach sprzedażnych. Mechanizacja i Automatyzaacja Górnictwa, 416, 9, 2005, 37–46
- [16] *Pielot J.*: Analiza wzbogacania węgla z technologicznymi sprzężeniami zwrotnymi. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1697, seria Górnictwo, 269, 2005, 523–534
- [17] *Pielot J.*: Sterowanie i optymalizacja produkcji zakładu przeróbki węgla w strukturach z recykulacją strumieni węgla. Raport merytoryczny z realizacji pracy BW/RGH-3/RG-0/2006, Gliwice 2007 (praca niepublikowana)
- [18] *Trybalski K.*: Optymalizacja w przeróbce kopaliny. Archiwum Górnictwa, 41, 3, 1996, 371–392