DE GRUYTER OPEN GOSPODARKA SUROWCAMI MINERALNYMI – MINERAL RESOURCES MANAGEMENT
2016 Volume 32 Issue 3 Pages 163–172
DOI 10.1515/gospo-2016-0021

STANISŁAW CIERPISZ*

Wpływ automatycznej regulacji procesu wzbogacania węgla w osadzarce na jej efektywność ekonomiczną

Wprowadzenie

Podstawowe grawitacyjne procesy wzbogacania węgla w cieczach ciężkich oraz w osadzarkach są wyposażone w układy automatycznej regulacji parametrów technologicznych decydujących o efektywności ekonomicznej tych procesów. W przypadku procesu wzbogacania węgla w cieczach ciężkich jest to gęstość cieczy ciężkiej, w przybliżeniu odpowiadająca tzw. gęstości rozdziału, a więc gęstości frakcji wzbogacanego węgla, która w połowie przechodzi do koncentratu (produktu pływającego) i w połowie do odpadów (produktu tonącego). Fluktuacje gęstości cieczy ciężkiej, powodowane np. dostawaniem się do obiegów roboczych cieczy wody z nadawą węgla surowego lub stratami magnetytu na przesiewaczach produktów z natryskami, powodują straty węgla w odpadach lub pogorszenie się jakości koncentratu. Fakt ten ma bezpośredni wpływ na efektywność ekonomiczną procesów wzbogacania.

Miały węgla surowego są wzbogacane w większości w osadzarkach wyposażonych standardowo w tzw. pływakowe układy regulacji odbioru produktu dolnego. Pływak metalowy – o odpowiednio dobranej gęstości i kształcie – powinien pośrednio wskazywać położenie warstwy o gęstości aktualnie wybranej jako tzw. pożądana warstwa rozdziału, która powinna w połowie przechodzić do koncentratu (produktu górnego) i w połowie do produktu dolnego (odpadów). Gęstość tej warstwy jest jednocześnie pożądaną gęstością rozdziału. Warstwa ta staje się faktycznie warstwą rozdziału, gdy osiąga położenie na wysokości pro-

* Prof. dr hab. inż., Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice; e-mail: stanislaw.cierpisz@polsl.pl

gu spiętrzającego materiał, przez który przedostaje się koncentrat (produkt górny). W układzie pływakowym gęstość rozdziału nie jest wobec tego znana, a efektywność procesu wzbogacania może być oceniana jedynie na podstawie analiz jakościowych prób pobranych z produktów lub popiołomierza radiometrycznego, mierzącego zawartość popiołu w koncentracie. Wynika z tego, że osadzarki wyposażone w pływakowe układy sterowania zwykle wymagają stałej obsługi przez operatora korygującego okresowo zadane położenie pływaka. Ostatnio przeprowadzono eksperymenty z układami regulacji z gęstościomierzami radiometrycznymi zainstalowanymi na wysokości progu, mierzącymi bezpośrednio gęstość rozdziału. W układach tych można więc stabilizować gęstość rozdziału bez interwencji ręcznej operatora.

W artykule przedstawiono uzyskiwane efekty ekonomiczne w układach wzbogacania grawitacyjnego w osadzarkach wyposażonych w pływakowe układy regulacji odbioru produktu dolnego oraz w układy regulacji z zastosowaniem gęstościomierzy radiometrycznych. Analizę przeprowadzono opierając się na modelach symulacyjnych procesów oraz pomiarach przemysłowych zmienności gęstości rozdziału występujących w praktyce. Na podstawie badań przemysłowych przyjęto, że fluktuacje gęstości rozdziału w układach pływakowych dochodzą do ±0,12 (0,15) g/cm^3, natomiast w układach z gęstościomierzem radiometrycznym są znacznie mniejsze i wynoszą około ±0,04 g/cm^3.

1. Model symulacyjny

Zjawiska zachodzące w osadzarce po raz pierwszy opisał Rittinger, określając wzór na graniczną prędkość opadania ziarna. Kolejnym opisem był model energetyczny Mayera, interpretujący zjawiska zachodzące w osadzarce różnicą energii potencjalnej między materiałem nierozwarstwionym nadawy a materiałem rozwarstwionym produktów wzbogacania (Dietrych 1953). Teoretyczne założenia tego modelu, mimo wielu uproszczeń, są z powodzeniem wykorzystywane nawet w najnowszych opracowaniach (King 2001). Uwzględnia się też rozluzowanie wzbogacanego materiału w zależności od czasu i wysokości warstwy. Przyczynowy opis zjawisk rozdziału w osadzarce zastał przedstawiony w pracy (Zapała 1994) i ten model wykorzystano w obliczeniach symulacyjnych. W modelu definiuje się liczby rozdziału w postaci wzoru:

$$n(\delta_j, \delta_{50}) = \frac{m(\delta_j, \delta_{50})}{M(\delta_j)} \tag{1}$$

- $m(\delta_j, \delta_{50})$ – masa ziaren frakcji o gęstości δ_j, znajdujących się w warstwach materiału o gęstościach mniejszych od gęstości rozdziału δ_{50},
- $M(\delta_j)$ – całkowita masa ziaren elementarnej frakcji o gęstości δ_j w nadawie do osadzarki.

Następnie, wykorzystując równanie różniczkowe Rittingera (Zapała 1994), zakładając istnienie hipotetycznej cieczy ciężkiej w łożu osadzarki oraz uwzględniając wpływ przyśpieszenia ruchu ziaren na proces ich rozdziału, zależność (1) doprowadzono do dwóch alternatywnych postaci. Jeżeli założy się stałe rozproszenie ziaren frakcji elementarnych, wtedy:

$$n(\delta_j,\delta_{50}) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\operatorname{tg} h\left[0{,}81439\frac{0{,}6745}{E_p}(\delta_j - \delta_{50})\right] \cong 1 - \Phi\left[\frac{0{,}6745}{E_p}(\delta_j - \delta_{50})\right] \tag{2}$$

$$E_p = \frac{\delta_{25} - \delta_{75}}{2} \tag{3}$$

Jeśli natomiast założy się stałą imperfekcję frakcji elementarnych, wtedy:

$$n(\delta_j,\delta_{50}) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\operatorname{tg} h\left[0{,}81439\frac{0{,}6745}{E_{pi}}(\delta_j - \delta_{50})\right] \cong 1 - \Phi\left[\frac{0{,}6745}{E_{pi}}(\delta_j - \delta_{50})\right] \tag{4}$$

$$E_{pj} = \frac{\delta_{25} - \delta_{75}}{\delta_{25} + \delta_{75}}\delta_j \tag{5}$$

E_{pj} – rozproszenie prawdopodobne frakcji elementarnej o gęstości δ_j.

Zależności powyższe pokazują, że krzywą rozdziału osadzarki można przy pewnych założeniach aproksymować dystrybuantą rozkładu normalnego. Krzywe rozdziału osadzarek i cyklonów wodnych nie zawsze są symetryczne względem punktu, odpowiadającego gęstości rozdziału; z tego powodu krzywe te aproksymowane są też dystrybuantą rozkładu logarytmiczno-normalnego, a praktycznie logarytmiczno-normalnego uciętego.

Model symulacyjny według zależności (2) zrealizowano w środowisku Matlab/Simulink.

2. Analiza efektów ekonomicznych

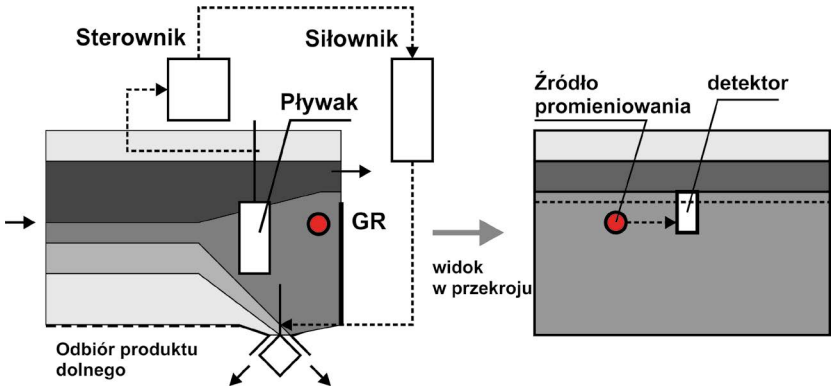
Przykładową analizę efektów ekonomicznych wynikających ze stosowania układów stabilizacji gęstości rozdziału przedstawiono dla osadzarkowych układów technologicznych, w których występują znacznie większe fluktuacje gęstości rozdziału niż w układach ze wzbogacalnikami z cieczą ciężką. Do analizy przyjęto trójproduktowe wzbogacanie miału surowego o charakterystyce wzbogacalności przedstawionej w tabeli 1. Jako gęstości rozdziału przyjęto odpowiednio: ρ_1 = 1,8 g/cm^3 w pierwszych przedziałach osadzarki wydzielających odpady i ρ_2 = 1,5 g/cm^3 w przedziale wydzielającym koncentrat i półprodukt. Poglądowy schemat pływakowego układu stabilizacji regulacji odbioru produktu dolnego z kontrolnym pomiarem gęstości rozdziału z zastosowaniem gęstościomierza radiometrycz-

nego przedstawiono na rysunku 1. Zastosowanie gęstościomierza radiometrycznego do pomiaru gęstości łoża w osadzarce przedstawiane było w pracach (Bartelt 1968; Lyman 1992; Cierpisz 2011).

Tabela 1. Charakterystyka wzbogacalności węgla surowego

Table 1. Raw coal washability characteristics

Lp.	Frakcja gęstościowa [g/cm^3]	Udział [%]	Zawartość popiołu [%]
1.	<1,35	40	6,0
2.	1,35–1,5	12	18,0
3.	1,5–1,65	4	30,0
4.	1,65–1,80	4	42,0
5.	1,80–1,95	12	54,0
6.	>1,95	30	72,0
		100	**35,5**



Rys. 1. Schemat blokowy pływakowego układu regulacji odbioru produktu dolnego z radiometrycznym gęstościomierzem jako systemem kontrolnym

Fig. 1. Scheme of a float-based control system of refuse discharge with a radiometric density meter as a monitoring unit

Podstawowym elementem układu jest metalowy pływak o odpowiednio dobranym kształcie i wymiarach. Położenie pływaka w pulsującym ośrodku powinno być ściśle związane (w stanie skrępowanym ośrodka) z położeniem warstwy materiału o wybranej gęstości, która powinna stale znajdować się na wysokości progu i być w ten sposób tzw. warstwą rozdziału. Ustalenie odpowiedniej gęstości rozdziału odbywa się przez dobór właściwego natężenia odbioru produktu dolnego. Zakłócenia występujące w osadzarce w postaci zmian

ilości nadawy i jej składu densymetrycznego powodują występowanie znacznych fluktuacji gęstości rozdziału. Zadaniem pływakowego układu sterowania odbiorem produktu dolnego jest minimalizacja tych fluktuacji. Stosowane obecnie pływaki mają kształt prostopadłościanu i różnią się wymiarami (objętością): pływaki (A) o wysokości 35–40 cm o objętości 10–11 dcm^3 (systemy Boss) oraz pływaki (B) mniejsze, o wysokości 19–20 cm i objętości 4–5 dcm ^{3} (systemy SSO). Gęstość pływaków dobiera się w przybliżeniu tak, aby ich prędkość opadania była równa prędkości opadania ziaren o najmniejszej założonej gęstości rozdziału.

Oznacza to, że gęstość pływaka, ze względu na znaczne różnice w rozmiarach w stosunku do średniej średnicy ziarna, jest istotnie mniejsza od gęstości rozdziału (gęstości warstwy rozdziału). Błędy pomiarowe pływaka, powodujące znaczne fluktuacje gęstości rozdziału na skutek zmian ilości i jakości nadawy, mogą być istotnie zmniejszone w przypadku zastąpienia pływaka przez radiometryczny gęstościomierz umieszczony w pobliżu progu przelewowego (Cierpisz 2011, 2009). Na rysunku 2 przedstawiono zmiany gęstości rozdziału mierzone za pomocą gęstościomierza radiometrycznego zainstalowanego na wysokości progu przelewowego (Cierpisz 2014). Rejestracje prowadzono przy stabilnej nadawie (ilości) i w warunkach znacznych zmian natężenia przepływu nadawy.

Zmiany gęstości rozdziału w warunkach niestabilnej nadawy mogą dochodzić nawet do 0,3 g/cm^3.

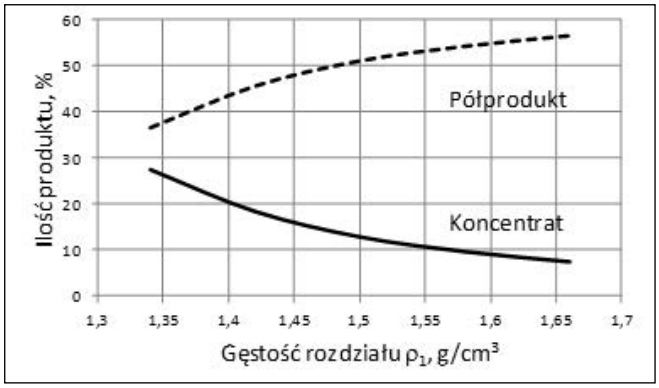
Analizowano wielkość efektów ekonomicznych w zależności od zmian gęstości rozdziału (±0,04, ±0,08, ±012 g/cm^3) wokół wartości średniej (1,46; 1,50; 1,54 g/cm^3). Wielkość efektów zależy w dużym stopniu od przyjętego kryterium technologiczno-ekonomicznego. Przyjęto, że celem produkcji jest utrzymanie strat węgla w odpadach na zadanym poziomie

Rys. 2. Fluktuacje gęstości rozdziału w układzie pływakowym mierzone z zastosowaniem gęstościomierza radiometrycznego

Fig. 2. Changes in the separation density over time in the float control system measured by the radiometric density meter

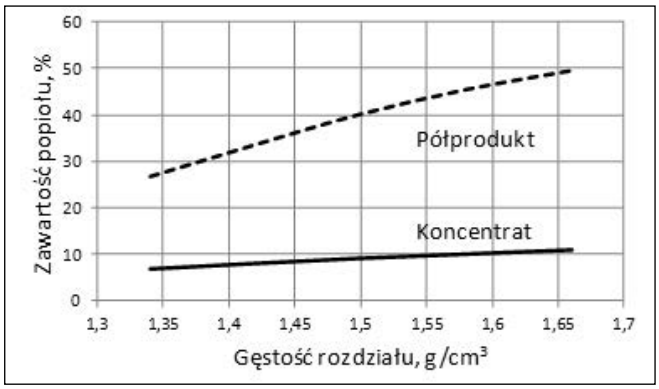
(np. 0,6%) oraz utrzymanie jakości koncentratu, wyrażonej w zawartości popiołu (wartości opałowej) poniżej wartości zadanej (8,5%, 9,0%, 9,5%). Założono, że cena jednostkowa koncentratu jest stała dla zawartości popiołu w koncentracie $A_k < A_{zad}$, kopalnia nie płaci kar umownych za przekroczenie zawartości popiołu powyżej zadanej, oraz że cena półproduktu nie zależy od zwiększonej zawartości popiołu i jest stała. Warunki te są korzystne dla kopalni i pozwalają na szacunek dolnej wielkości spodziewanego wzrostu wartości produkcji.

Zależności parametrów ilościowych i jakościowych produktów oraz udziału frakcji gęstościowych w produktach od gęstości rozdziału r_1 przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Przyjęto gęstość rozdziału $\rho_2 = 1{,}8$ g/cm^3, dla której udział odpadów $Q_o = 37{,}8\%$, zawartość popiołu w odpadach $A_o = 71{,}2\%$ i straty węgla w odpadach $Q_{k/o} = 0{,}6\%$ (dla imperfekcji I = 0,12).



Rys. 3. Zależność ilości koncentratu Q_k i półproduktu Q_p od gęstości rozdziału ρ_1

Fig. 3. Yield of concentrate Q_k and middlings Q_p as a function of the separation density ρ_1



Rys. 4. Zależność zawartości popiołu w koncentracie A_k i w półprodukcie A_p od gęstości rozdziału ρ_1

Fig. 4. Ash content in concnetrate A_k and in middlings A_p as a function of the separation density ρ_1

Przyjęto następujące oznaczenia:

- Q_k – ilość koncentratu [%],
- A_k – zawartość popiołu w koncentracie [%],
- Q_p – ilość półproduktu [%],
- A_p – zawartość popiołu w półprodukcie [%],
- $Q_{p/k}$ – udział półproduktu w koncentracie [%].

Zestawienie wyznaczonych zmian w udziałach produktów (koncentrat i półprodukt) dla różnych zmian gęstości rozdziału zestawiono w tabeli 2. Wprowadzono następujące oznaczenia:

- ρ_{zad} – zadana gęstość rozdziału [g/cm^3],
- $\Delta\rho$ – przedział wahań gęstości w układzie regulacji [g/cm^3],
- ΔQ_k – zmiana ilości koncentratu [%] dla zmian $\Delta\rho$ [%],
- ΔQ_p – zmiana ilości półproduktu [%] dla zmian $\Delta\rho$ [%].

Tabela 2. Zmiany ilości produktów w zależności od zmian gęstości rozdziału

Table 2. Changes in yield of products as a function of the separation density

ρ_{zad}	g/cm^3	1,46			1,50			1,54		
$\Delta\rho$	g/cm^3	±0,04	±0,08	±0,12	±0,04	±0,08	±0,12	±0,04	±0,08	±0,12
ΔQ_k	%	–1,5	–3,2	–6,8	–0,5	–2,3	–5,2	–0,4	–1,5	–3,6
ΔQ_p	%	0,9	3,2	6,8	0,5	2,3	5,2	0,4	1,5	3,6

Na podstawie danych zawartych w tabeli 2 można obliczyć zmianę (straty) wartości produkcji wynikającą ze sprzedaży koncentratu i półproduktu. Zmniejszenie ilości koncentratu przy większych wahaniach gęstości rozdziału powoduje zmniejszenie wartości produkcji, natomiast zwiększenie ilości półproduktu powoduje wzrost wartości. Łączny efekt zmiany wartości produkcji można wyznaczyć z przybliżonej zależności (dla $Q_p/Q_k \approx 0{,}3$ i $C_p/C_k \approx 0{,}3$):

$$\Delta W\% \approx \Delta Q_k - 0{,}1 \cdot \Delta Q_p \tag{6}$$

Jeżeli na skutek wprowadzenia nowego układu regulacji można zmniejszyć fluktuacje gęstości rozdziału z ±0,12 g/cm^3 do przykładowo ±0,04, to dla osadzarki o wydajności 150 Mg/h koncentratu (np. 300 zł/tonę), pracującej 5000 h/rok, sumaryczny efekt przyrostu wartości produkcji wyniesie w ciągu roku około 5,3% (dla ρ_{zad} = 1,46 g/cm^3), 4,8% (dla ρ_{zad} = 1,50 g/cm^3) i 3,2% (dla ρ_{zad} = 1,54 g/cm^3). Odpowiada to średnio wartości produkcji około 10 mln zł.

Dla porównania wyznaczono wpływ zmian imperfekcji I osadzarki na parametry produktów oraz straty węgla (<1,5 g/cm^3) w odpadach, zestawione w tabeli 3.

Tabela 3. Wpływ imperfekcji na parametry produktów

Table 3. Influence of imperfection on the parameters of products

I	Q_k	A_k	Q_p	A_p	Q_o	A_o	$Q_p/_k$	$Q_k/_o$	ΔQ_k	ΔQ_p	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
0,12	51,1	9,1	12,7	40,2	37,8	71,2	1,6	0,6	0	0	$\rho_1 = 1,8$
0,13	50,6	9,1	13,4	40,2	37,6	70,9	1,7	1,0	–0,5	0,7	$\rho_2 = 1,5$
0,15	49,5	9,2	14,8	40,3	37,3	70,2	2,0	1,9	–1,6	2,1	$\Delta\rho = 0$
0,18	47,7	9,2	16,9	40,2	37,1	68,8	2,4	3,8	–3,4	4,2	
0,20	46,4	9,3	18,2	40,1	37,0	67,7	2,6	5,3	–4,7	5,5	

Zmiany ilości koncentratu i półproduktu powodowane zmianami imperfekcji (0,12––0,20) są porównywalne ze zmianami powodowanymi fluktuacjami gęstości rozdziału (0,04–0,12 g/cm^3).

Wnioski

1. Efekty ekonomiczne wzbogacania węgla w osadzarkach w znacznym stopniu zależą od rozproszenia ziaren materiału w łożu reprezentowanego przez wartość imperfekcji oraz od fluktuacji gęstości rozdziału powodowanej błędami regulacji pływakowych układów odbioru produktu dolnego.
2. Fluktuacje gęstości rozdziału w osadzarkach są znaczne i dochodzą do 0,3 g/cm^3 (±0,15 g/cm^3). Błędy regulacji gęstości rozdziału mogą być zmniejszone w układach stosujących gęstościomierze radiometryczne (0,02–0,04 g/cm^3).
3. Efekty ekonomiczne wynikające ze zmniejszenia fluktuacji rozdziału z np. ±0,12g/cm^3 do ±0,04 g/cm^3 wynoszą około 4,0–5,0% nominalnej wartości produkcji. Efekty te są porównywalne ze zmniejszeniem imperfekcji osadzarki z np. 0,20 do 0,12).

LITERATURA

Bartelt, D. 1968. Dry preparation of small coal using radioisotopes for control of shale extraction. *V International Coal Preparation Congress*, Pittsburgh.

Cierpisz, S. 2011. Analiza procesu rozdziału węgla na produkty w osadzarce z zastosowaniem gęstościomierza radiometrycznego. *Górnictwo i Geologia* t. 6, z. 2, Gliwice.

Cierpisz, S. 2014. Wpływ efektywności układu odbioru produktów w osadzarce na ocenę procesu wzbogacania węgla. *Konferencja KOMEKO*, Kliczków.

Cierpisz, S. i Kowol, D. 2009. Wpływ zakłóceń procesu wzbogacania węgla w osadzarce na zmiany gęstości rozdziału – badania laboratoryjne. *Gór. Geoinż. AGH* nr 4.

Dietrych, J. 1953. *Osadzarki*. Katowice: PWT.

King, R.P. 2001. *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Butterworth-Heineman.
Lyman, G.J. 1992. Review of jigging principles and control. *Coal Preparation* 11 (1–2), s. 41–72.
Zapała, W. 1994. Teoretyczny model krzywej rozdziału osadzarki. *Materiały XII ICPC*, Kraków.

WPŁYW AUTOMATYCZNEJ REGULACJI PROCESU WZBOGACANIA WĘGLA W OSADZARCE NA JEJ EFEKTYWNOŚĆ EKONOMICZNĄ

Słowa kluczowe

wzbogacanie węgla, osadzarka, układ sterowania, efekty ekonomiczne

Streszczenie

Przedstawiono wpływ automatycznej regulacji procesów wzbogacania grawitacyjnego węgla w osadzarkach na niedokładność rozdziału ziaren węgla, charakteryzowaną krzywą rozdziału, oraz wpływ fluktuacji gęstości rozdziału na ilość i jakość produktów. Na przykładach procesów wzbogacania dwu- i trójproduktowego oszacowano wzrost wartości produkcji wraz z polepszeniem jakości regulacji. Efekty ekonomiczne wzbogacania węgla w osadzarkach w znacznym stopniu zależą od rozproszenia ziaren materiału w łożu reprezentowanego przez wartość imperfekcji oraz od fluktuacji gęstości rozdziału powodowanej błędami regulacji pływakowych układów sterowania odbiorem produktu dolnego. W układach tych fluktuacje gęstości rozdziału dochodzą do ±0,15 g/cm^3. Analizę zilustrowano przykładami zastosowań układów sterowania opracowanych przez Instytut EMAG.

IMPACT OF THE AUTOMATIC CONTROL OF A COAL SEPARATION PROCESS IN A JIG ON ITS ECONOMIC EFFICIENCY

Keywords

coal preparation, jig, control system, economic effects

Abstract

The beneficiation process of fine coal in jigs consists of two phases: stratification of coal grains in the bed according to their density and then splitting the stratified material into the product and the discharged refuse. At first, during subsequent water pulsations induced by opening and closing of air valves, the stratification of coal grains takes place due to varied velocity of their upward and downward movement.

Grains of low density migrate to upper layers and grains of high density migrate to lower layers of the bed. The material travels horizontally on a screen along the jig compartment with the flow of water.

The stratification of grains due to their density is not perfect, because the velocity of their upward and downward movement depends in part on their diameter, shape and the way in which the material

loosens within a given pulsation cycle. The distribution of coal density fractions in the bed, characterized by the imperfection factor *I*, has been investigated by many researchers. The imperfection factor *I* is defined as the ratio of the probable error *Ep* and the separation density ρ_{50} ($I = Ep/\rho_{50}$).

The distribution of coal density fractions for an ideal and a real stratification process was compared. The maximum mass of the product of the desired quality (ash content) can be achieved for the ideal process when the imperfection $I = 0$. The stratified bed is then, in the end part of the jig, split into the product which overflows the end wall of the compartment and the refuse (or middlings) discharged through the bottom gate. The separation density (cut point) is established by the tonnage of the discharged bottom product (opening of the discharge gate). The separation density depends also on the tonnage of raw coal feeding the jig, and its washability characteristics. The impact of variations in the separation density on product parameters has been analysed. The mass of the product is always greater when the separation density is constant over a given period of time – even if in spite of its variations the process renders the same average ash content. Hence, the conclusion is to stabilise the separation density at the desired value as accurately as possible. The analysis was performed for raw coal washed in a three-product jig at the separation densities of 1.5 and 1.8 g/cm^3. Percent contents (in brackets) of density fractions in raw coal were: <1.35 g/cm^3 (40%), 1.35–1.50 g/cm^3 (12%), 1.50–1.65 g/cm^3 (4%), 1.65–1.80 g/cm^3 (4%), 1.80–1.95 g/cm^3 (12%, >1.95 g/cm^3 (30%) (average ash in raw coal was 35.5%). In the analysis, an increase in the imperfection by 0.02 resulted in the decrease of the product tonnage by $\Delta Qc = 1.0\%$. In this case, separation densities were set to ensure the same ash content in products (for $I = 0$ the change in tonnage was accepted at $\Delta Qc = 0$). The simulation analysis presented in the paper focused on the impact that fluctuations in separation density have on the economic effects of a jig operation. The influence of the separation density fluctuations on the product tonnage turned out to be nonlinear; for ±0.04 g/cm^3 (control system with the radiometric density meter) the decrease in the product tonnage was ca. 0.5 % and for ±0.12 g/cm^3 it was ca. 5.0% (control system with a float). The above results indicate that the operation of a refuse discharge system in a jig plays an important role in the final results of coal separation process defined in terms of tonnage and quality of the product.