



SERGIUSZ BORON*, JOACHIM PIELOT**, ANTONI WOJACZEK*

Ocena opłacalności wzbogacania węgla w układach osadzarek

Wprowadzenie

Wychody produktów wzbogacania oraz ich jakość – a zatem również wartość produkcji – zależą od wzbogalności węgla surowego, stopnia złożoności i konfiguracji układu technologicznego przeróbki węgla oraz parametrów rozdziału operacji przerobczych. Porównanie efektów wzbogacania węgla surowego w różnych układach technologicznych, zwłaszcza porównanie wartości produkcji o zadanej jakości, pozwala ocenić przydatność poszczególnych wariantów wzbogacania (Yagun i in. 2002). Dotychczas w kilku publikacjach wykazane zostało (Pielot 2009, 2010a, 2010b, 2010c, 2011a), że w układach grup wzbogalników grawitacyjnych możliwe jest uzyskanie istotnego wzrostu wartości produkcji koncentratu w porównaniu do pojedynczego wzbogalnika – wzrost ten występuje przy produkcji koncentratów o dobrych parametrach jakościowych. Rozważania te dotyczyły najczęściej przyrostu wartości produkcji w grupie osadzarek względem wartości produkcji uzyskiwanej z jednej osadzarki. Choć sam przyrost wartości produkcji może już być ekonomiczną przesłanką rozbudowy układu wzbogacania, to jednak należy rozpatrzyć również wzrost kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, wynikający z instalacji dodatkowej maszyny (maszyn) przerobczych. W cytowanych publikacjach nie rozpatrywano zagadnień związanych z kosztami z racji fragmentarycznych, niespójnych i istotnie różniących się dostępnymi danymi, pochodzącymi z różnych źródeł. W niniejszym opracowaniu oszacowane zostały koszty produkcji: inwestycyjne oraz eksploatacyjne. Porównane zostały

* Dr inż., ** Dr hab. inż., prof. nzw w Pol.Śl, Politechnika Śląska, Gliwice; e-mail:Joachim.Pielot@polsl.pl

przyrosty wartości produkcji oraz przyrosty kosztów eksploatacyjnych w dwóch układach wzbogacania wielokrotnego w osadzarkach, odniesione do odpowiednich wartości w przypadku produkcji w jednej osadzarce – p. 1.4. Analogiczne porównania, dotyczące równoległego wzbogacania węgla w osadzarkach w wąskich klasach ziarnowych (z klasyfikacją wstępną) oraz w szerokiej klasie ziarnowej (bez klasyfikacji wstępnej) przedstawione zostały w p. 2.

1. Ocena opłacalności wielokrotnego wzbogacania węgla w grupie osadzarek

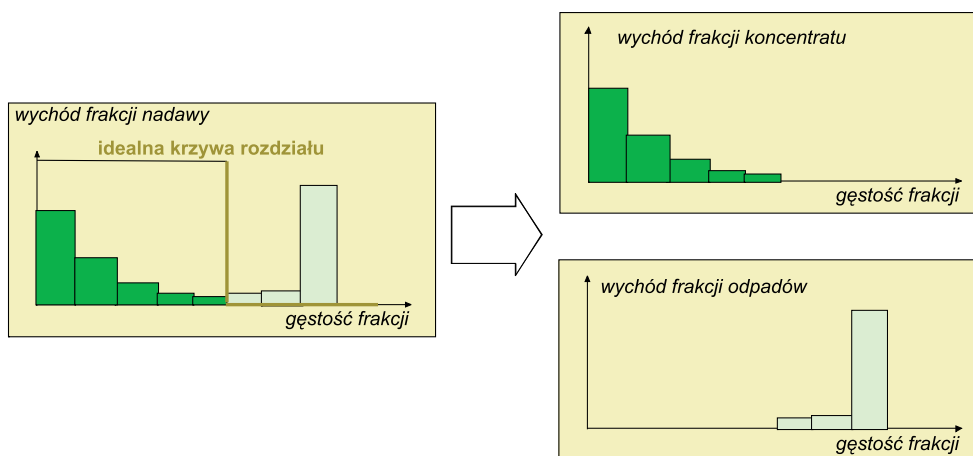
Gdyby proces rozdziału strugi węgla surowego we wzbogalniku grawitacyjnym przebiegał idealnie, wtedy wszystkie ziarna o gęstości mniejszej od *gęstości rozdziału* trafiłyby do koncentratu, a wszystkie ziarna o gęstości większej stanowiłyby odpady. Dla wzbogalników idealnych krzywa rozdziału ma charakter nieciągły – skokowy. Liczby rozdziału dla koncentratu $f(\delta)$ przyjmują tylko dwie wartości, zależnie od tego, czy gęstość elementarnych frakcji nadawy δ jest mniejsza czy większa od gęstości rozdziału δ_{50} :

$$f(\delta) = 1 \quad \text{dla} \quad \delta \leq \delta_{50} \quad (1)$$

$$f(\delta) = 0 \quad \text{dla} \quad \delta > \delta_{50}$$

Sytuacja taka jest przedstawiona na rysunku 1.

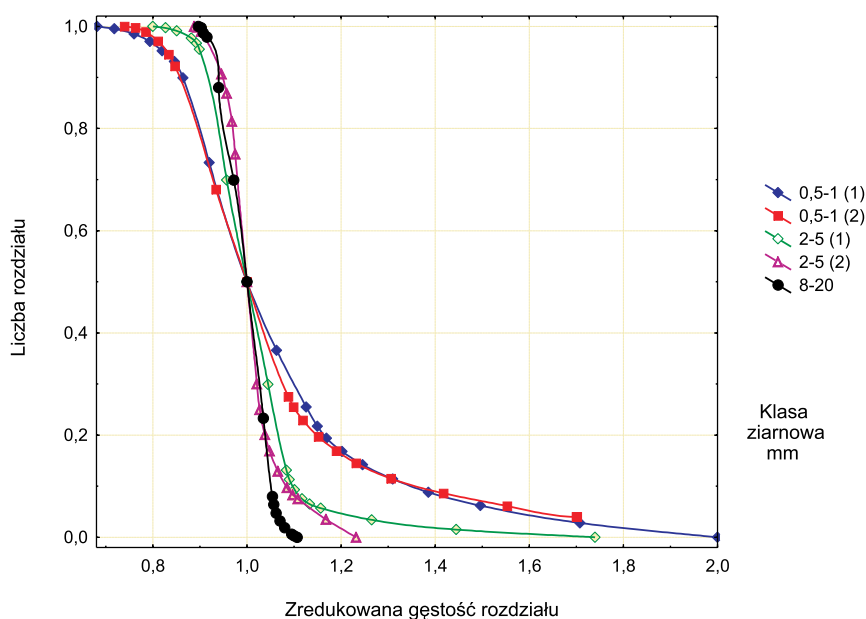
Procesy wzbogacania z natury nie mogą być idealne, dlatego rzeczywiste krzywe rozdziału mają kształt gorszy od krzywej idealnej i dla koncentratu węglowego są krzywymi



Rys. 1. Ilustracja procesu idealnego wzbogacania grawitacyjnego

Fig. 1. Illustration of an ideal gravity separation process

ciągłymi monotonicznie malejącymi. Wskutek nieidealnego przebiegu procesów wzbogacania w produktach wzbogacania pojawiają się ziarna błędne. Są to ziarna frakcji odpadowych o gęstości większej od gęstości rozdziału, trafiające do koncentratu i stanowiące jego zanieczyszczenie oraz ziarna węgla o gęstości mniejszej od gęstości rozdziału, trafiające do odpadów i stanowiące straty węgla w odpadach. Na rysunku 2 przedstawione zostały wybrane krzywe rozdziału osadzarki, dotyczące takich klas ziarnowych, jakie określone zostały w charakterystyce gęstościowo-jakościowej węgla surowego, wykorzystanej w dalszych obliczeniach.

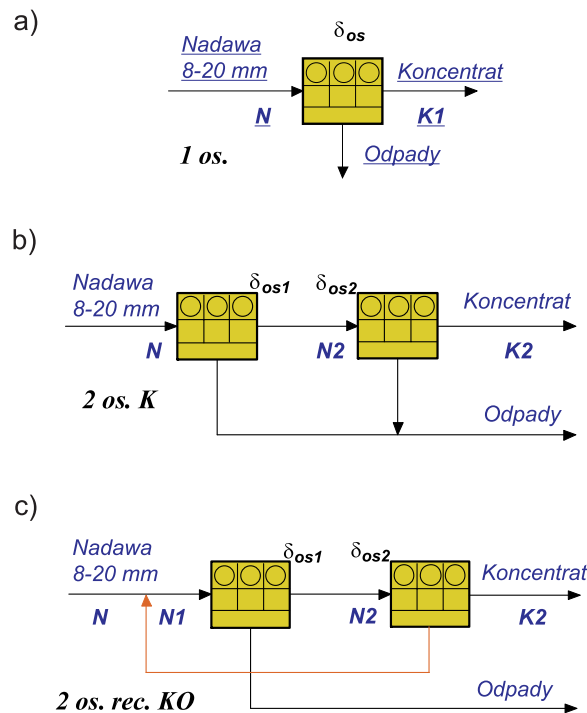


Rys. 2. Krzywe rozdziału osadzarki dwuproduktowej

Fig. 2. Partition curves of a two products jig

Na rysunku 3 przedstawione są rozpatrywane w p. 1 układy wzbogacania.

Układ z jedną osadzką 1 os. (rys. 3a) jest układem odniesienia – wyniki uzyskane dla pozostałych dwóch układów zostały porównane z wynikami uzyskanymi dla tego układu. Na rysunku 3b przedstawiony jest układ dwóch osadzek z ponownym wzbogacaniem koncentratu (2 os. K), zaś na rysunku 3c układ dwóch osadzek z recyrkulacją produktu pośredniego (2 os. rec. KO). Są to układy wzbogacania wielokrotnego, ale bez rozdrabniania produktów pośrednich. Układy wzbogacania wtórnego z recyrkulacją i bez recyrkulacji produktów są wprawdzie znane w teorii i technice przeróbki surowców mineralnych (Martyniak 1996; Śmiejek 2006; Venkoba Rao 2008), jednak w przypadku wzbogacania węgla są stosowane względnie rzadko. W monografii (Pielot 2011a) wykazane zostało, że zastosowanie drugiej osadzarki, zarówno w układzie 2 os. K jak i w układzie 2 os. rec. KO, poprawia kształt zastępczych krzywych rozdziału układu dwóch osadzek traktowanych



Rys. 3. Układy wzbogacania węgla

a) w jednej osadzarkę (1 os.), b) w dwóch osadzarkach z ponownym wzbogacaniem koncentratu (2 os. K),
c) w dwóch osadzarkach z recyrkulacją produktu pośredniego (2 os. rec. KO)

Fig. 3. Systems of coal cleaning

a) with one jig, b) with two jiggs with secondary enrichment,
c) with two jiggs with recirculation of an intermediate product

jak jeden wzbogalnik dwuproduktowy. Poprawa kształtu zastępczych krzywych rozdziału w układach 2 os. K i 2 os. rec. KO zmniejsza wskaźnik niedokładności wzbogacania E_p (rozproszenie prawdopodobne). Dzięki temu, aby uzyskać odpowiednią jakość koncentratu, określaną przez zawartość popiołu, należy zadać w obydwu osadzarkach większe gęstości rozdziału niż w układzie referencyjnym z jedną osadzarką 1 os., a to skutkuje większym wychodem koncentratu końcowego oraz większą wartością produkcji.

W przedstawionych w artykule analizach przyjęto, że węgiel surowy jest trudno wzbogalalny. Przy wzbogacaniu takiego węgla ilość ziarn błędnych jest duża i wtedy celowe jest stosowanie układów osadzarek, w których zachodzi efekt wspomnianej wyżej poprawy kształtu zastępczych krzywych rozdziału. W tabeli 1 podana jest charakterystyka gęstościowo-jakościowa węgla surowego w zakresie klas ziarnowych 0,5–20 mm, przy czym w p. 1 prognozy symulacyjne dotyczyły klasy ziarnowej 8–20 mm.

Tabela 1. Charakterystyka gęstościowo-jakościowa nadawy

Table 1. Density and quality characteristics of raw coal feed

| Gęstość frakcji [g/cm ³] | Wychód frakcji [%] | Zawartość popiołu [%] | Zawartość siarki całkowitej [%] | Wartość opałowa [kJ/kg] |
|---|-----------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| < 1,30 | 12,15 | 4,67 | 0,84 | 30 680 |
| 1,30–1,35 | 17,96 | 7,40 | 0,86 | 29 630 |
| 1,35–1,40 | 10,95 | 10,99 | 0,97 | 27 300 |
| 1,40–1,50 | 8,47 | 17,92 | 1,10 | 25 750 |
| 1,50–1,60 | 7,43 | 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 | 2,57 | 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 |

1.1. Przyrost wartości produkcji przy wielokrotnym wzbogacaniu węgla

Wartość produkcji koncentratu w układach z rysunku 3 rozumiana jest jako iloczyn masy koncentratu i jego ceny jednostkowej, wyznaczonej z formuły sprzedażnej z 1990 (Blaschke i in. 1991) lub z 4. wersji formuły sprzedażnej z 2002 (Lorenz i in. 2002):

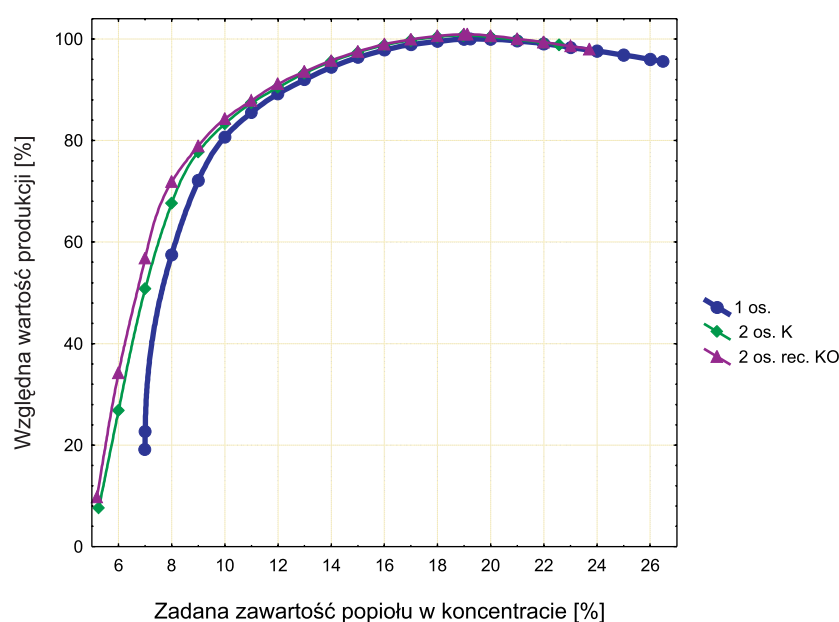
$$WP_{K1i}(\delta_{os}) = M_{K1i}(\delta_{os}) \cdot C_{K1i}(\delta_{os}) \quad (2a)$$

$$WP_{K2i}(\delta_{os1}, \delta_{os2}) = M_{K2i}(\delta_{os1}, \delta_{os2}) \cdot C_{K2i}(\delta_{os1}, \delta_{os2}) \quad (2b)$$

- ↗ WP_K – wartość produkcji koncentratu [zł/godz.],
 $\delta_{os}, \delta_{os1}, \delta_{os2}$ – gęstości rozdziału w osadzarkach (zmiennie decyzyjne algorytmu maksymalizacji produkcji) [g/cm³],
 M_K – masa koncentratu [Mg/godz.],
 C_K – cena jednostkowa koncentratu z formuły sprzedażnej [zł/Mg].

Maksymalizowana jest funkcja (2) przy ograniczeniu równościowym, którym jest zadawana zawartość popiołu w koncentracie. Modele symulacyjne operacji wzbogacania oraz algorytm maksymalizacji produkcji opisane zostały w publikacjach (Cierpisz i Pielot 2001; Pielot 2011a).

Na rysunku 4 pokazana jest względna, maksymalna wartość produkcji (Pielot 2009). Każdy punkt na tych wykresach uzyskany został przy każdorazowo optymalnych gęstościach rozdziału. Jako poziom odniesienia przyjęta została maksymalna wartość produkcji uzyskiwana w układzie z pojedynczą osadzarką, traktowana jako 100%. Wartość produkcji w układach z dwiema osadzarkami jest zawsze większa niż w przypadku pojedynczej osadzarki przy tej samej zawartości popiołu w koncentracie (Pielot 2004), co wynika z lepszej dokładności wzbogacania w układach 2 os. K (rys. 3b) oraz 2 os. rec. KO (rys. 3c).



Rys. 4. Maksymalna wartość produkcji przy różnych zadanych zawartościach popiołu w koncentracie, przy formule sprzedażnej z 2002 roku (Pielot 2009)

Fig. 4. Maximum production values at different demanded concentrate ash contents, at sales formula from 2002 (Pielot 2009)

Przyrost wartości produkcji w układzie 2 os. K (rys. 3b) albo 2 os. rec. KO (rys. 3c), względem wartości produkcji w układzie 1 os. (rys. 3a), przy kolejnych zawartościach popiołu (i) w koncentracie, wynosi:

$$\Delta WP_{Ki} = [M_{K2i}(\delta_{os1}, \delta_{os2}) - M_{K1i}(\delta_{os})] - C_{Ki} = \Delta M_{Ki} \cdot C_{Ki} \quad (3)$$

↗ ΔWP_K – przyrost wartości produkcji koncentratu [zł/godz.],
 ΔM_K – przyrost masy koncentratu [Mg/godz.].

Prognozy symulacyjne dotyczyły klasy ziarnowej 8–20 mm, przy której dokładność wzbogacania jest najlepsza (krzywa rozdziału ma kształt najbardziej zbliżony do idealnego – rys. 2). Przy wzbogacaniu mniejszych ziarn węgla przyrost wartości produkcji w układach z dwiema osadzarkami jest jeszcze większy.

1.2. Koszty zakupu, montażu i remontów osadzarki

Rozstrzygnięcie kwestii, czy w odpowiednio krótkim czasie możliwe jest zrekompen-sowanie kosztów inwestycyjnych zakupu i instalacji dodatkowej osadzarki jest ważnym zagadnieniem – nadmienić należy, że osadzarka ta może być maszyną o mniejszej wydajności, gdyż jest do niej kierowana mniejsza ilość materiału do wzbogacania (N_2 na rys. 3b i 3c). Poniżej przedstawiony jest przybliżony rachunek kosztów inwestycyjnych i remontowych (Bartoniak i Głowiak 2003).

Koszty zakupu i montażu osadzarki o wydajności 250 Mg/godz. to 1,8 mln zł (ceny z 2012 roku). W zakładanym 15-letnim czasie pracy (Bartoniak i Głowiak 2003) (20 lat według (Śmiejek 2006)) oraz eksploatacji przez 4000 godz. w ciągu roku, osadzarka ta wzbogaci:

$$15 \text{ lat pracy} \times 4\,000 \text{ godz./rok} \times 250 \text{ Mg/godz.} = 15 \text{ mln Mg nadawy}$$

Jeśli produkty sprzedażne stanowią ilościowo 65% nadawy, to koszt inwestycyjny osadzarki, w przeliczeniu na 1 Mg produktów sprzedażnych, wynosi:

$$1,8 \text{ mln zł} / (0,65 \times 15 \text{ mln Mg nadawy}) = 18,5 \text{ gr/Mg produktu}$$

Z założenia, że w ciągu 15 lat pracy koszty remontów nie powinny przekroczyć kosztów zakupu osadzarki – a więc 18,5 gr/Mg produktu – wynika, iż całkowity koszt inwestycji i remontów w przeliczeniu na 1 Mg produktów sprzedażnych to 37 groszy. Analogicznie w przypadku osadzarki o wydajności 400 Mg/godz. (koszty zakupu i montażu osadzarki to 2 mln zł), całkowity koszt inwestycji i remontów w przeliczeniu na 1 Mg produktów sprzedażnych wynosi 26 groszy. W dalszych rozważaniach (p. 1.4 i p. 2) koszty te zostały pominięte.

1.3. Przyrost kosztów eksploatacyjnych

W bibliografii przedmiotu istnieją pozycje opisujące obliczanie kosztów stanowiących w zakładzie przeróbki węgla (Blaschke i in., 1992; Gawlik 2006; Mokrzycki 2001; Stępiński 1973). Praktycznie trudno jednak szacować wartość poszczególnych składników kosztów eksploatacyjnych z powodu fragmentarycznych, niespójnych i istotnie różniących się dostępnych danych, pochodzących z różnych źródeł. Z tego powodu, aby wyznaczyć przyrost kosztów eksploatacyjnych w układzie technologicznym, wynikający z zainstalo-

wania dodatkowej osadzarki, przyjęto stały koszt jednostkowy wzbogacania w osadzarce (11 zł/Mg – ceny z 2012 roku), obejmujący koszty materiałów eksploatacyjnych, utrzymania ruchu, remontów oraz koszty osobowe. Przyrost kosztów eksploatacyjnych produkcji w układzie *2 os. K* (rys. 3b) jest więc iloczynem tychże kosztów jednostkowych oraz masy nadawy do drugiej osadzarki – zależność (4a). Natomiast w układzie *2 os. rec. KO* (rys. 3c) jest to iloczyn kosztów jednostkowych oraz sumy masy nadawy do drugiej osadzarki i masy nadwyżki nadawy do pierwszej osadzarki $M_{N1} - M_N$ – zależność (4b):

$$\Delta Ke_i = M_{N2i} \cdot Kj_{os} \quad (4a)$$

$$\Delta Ke_i = (M_{N1i} - M_N + M_{N2i}) \cdot Kj_{os} \quad (4b)$$

- ↪ ΔKe – przyrost kosztów eksploatacyjnych produkcji [zł/godz.],
 M_{N1} , M_{N2} – masy nadawy do pierwszej i drugiej osadzarki [Mg/godz.],
 Kj_{os} – koszt jednostkowy wzbogacania w osadzarce [zł/Mg].

1.4. Porównanie przyrostu wartości produkcji oraz przyrostu kosztów eksploatacyjnych

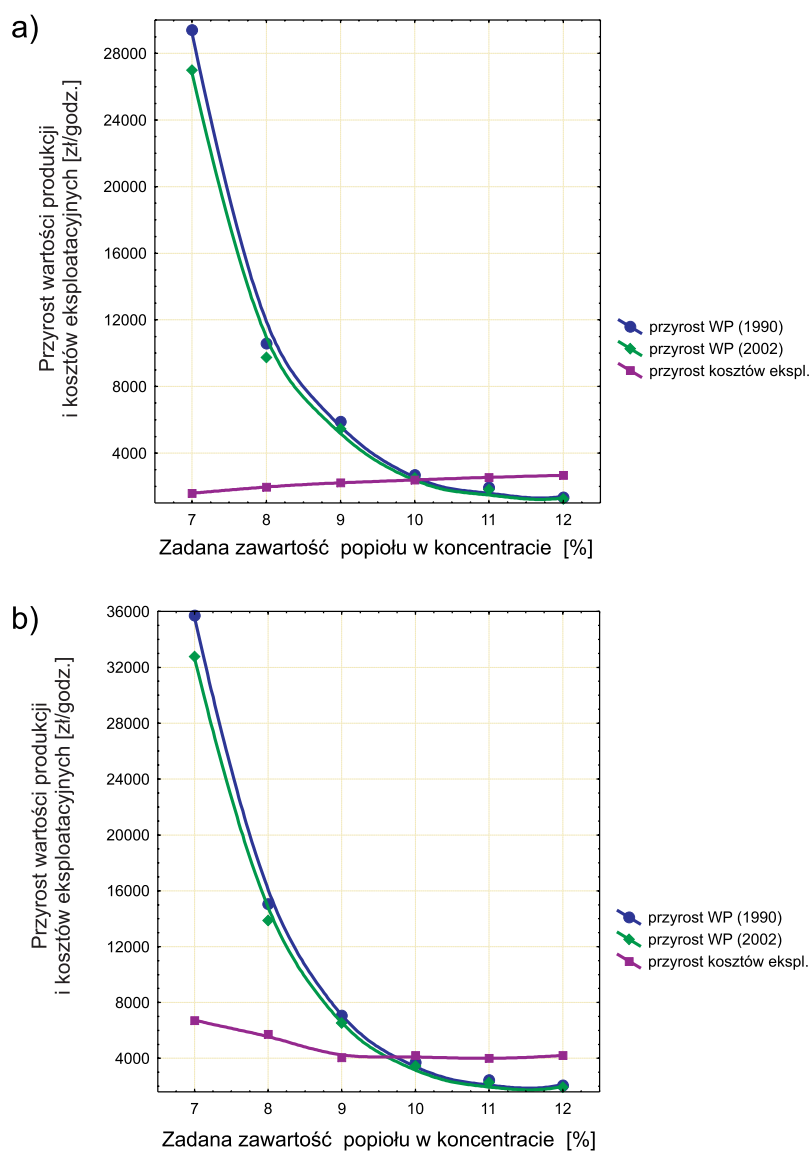
Na rysunku 5 przedstawiony został przyrost wartości produkcji (przy dwóch formułach sprzedażnych) oraz przyrost kosztów eksploatacyjnych w układach: *2 os. K* (rys. 3b) oraz *2 os. rec. KO* (rys. 3c). Obliczenia zostały przeprowadzone przy założeniu, że masa nadawy wynosi 400 Mg/godz.

Różnica między przyrostem wartości produkcji a przyrostem kosztów eksploatacyjnych stanowi zysk zakładu, wynikający z zainstalowania dodatkowej osadzarki:

$$Z_i = \Delta WP_i = \Delta Ke_i = \Delta M_{Ki} \cdot C_{Ki} - \Delta Ke_i \quad (5)$$

- ↪ Z – zysk zakładu przeróbki węgla [zł/godz.].

Jak wynika z rysunku 5 zysk zakładu występuje przy małej zawartości popiołu w koncentracie, a więc przy dobrej jego jakości. Wobec postulowanej poprawy jakości wzbogacanego węgla, w ramach programu technologii produkcji czystych węgla (Blaschke i Nycz 2003; Pielot 2011a), zainstalowanie dodatkowej osadzarki jest więc opłacalne.



Rys. 5. Przyrost maksymalnej wartości produkcji przy różnych zadanych zawartościach popiołu w koncentracie (przy formułach sprzedażnych z 1990 i 2002 roku) oraz przyrost kosztów eksploatacyjnych w układach: a) 2 os. K, b) 2 os. rec. KO

Fig. 5. Increase in maximum production value at different demanded values of ash contents in concentrate (at sales formulas from 1990 and 2002) and increase in system operating costs in 2-jig system: a) 2 os. K, b) 2 os. rec. KO

2. Ocena opłacalności równoległego wzbogacania węgla w osadzarkach w wąskich klasach ziarnowych

Jeśli ilość nadawy przekracza możliwości wzbogacalników pod względem wydajności, wtedy stosuje się wzbogacanie równoległe przykładowo w dwóch lub trzech osadzarkach po rozdeleniu strumienia nadawy – układ 3 os. na rysunku 6a. Postulowana jest jednak klasyfikacja wstępna nadawy do grupy osadzarek pracujących równoległe i wzbogacanie w poszczególnych osadzarkach wąskich klas ziarnowych (Głowiak 2009), jak w układzie 3 os. kl na rysunku 6b. Aby uzyskać maksymalną wartość produkcji przy zadanej jakości koncentratu, w układzie 3 os. wyznaczone – przez algorytm maksymalizacji produkcji – gęstości rozdziału w każdej osadzarce przyjmują taką samą wartość liczbową, natomiast w układzie 3 os. kl wyznaczone gęstości rozdziału w każdej osadzarce są różne, nawet, jak w rozpatrywanym tutaj przykładzie, przy takich samych charakterystykach wzbogalności w poszczególnych klasach ziarnowych nadawy. Algorytm dobiera różne gęstości rozdziału z powodu różnej dokładności wzbogacania w różnych klasach ziarnowych (rys. 2). Oprócz wzrostu wartości produkcji przy wzbogacaniu wąskich klas ziarnowych (Pielot 2010b, 2010c), możliwe jest uzyskanie mniejszej zadanej zawartości popiołu w koncentracie. Układ 3 os. kl (rys. 6b) jest też znacznie mniej wrażliwy – pod względem zmian ilości i jakości koncentratu końcowego – przy zmianach składu ziarnowego nadawy, co opisane zostało w opracowaniach (Pielot 2010d, 2011b).

W niżej podanych analizach do obliczeń przyjęto tę samą charakterystykę gęstościowo-jakościową węgla surowego trudno wzbogalnego jak w p. 1. (tab. 1), z tym, że podana charakterystyka gęstościowo-jakościowa dotyczy tutaj zakresu klas ziarnowych 0,5–20 mm. Charakterystyka składu ziarnowego podana jest w tabeli 2 i została tak określona, aby po klasyfikacji wstępnej ilość nadawy do każdej osadzarki w układzie 3 os. kl była prawie taka sama i stanowiła 1/3 ilości całej nadawy. Podobnie w układzie 3 os. rozdzielanie strumienia nadawy powoduje, że ilość nadawy do każdej osadzarki jest równa 1/3 ilości całej nadawy.

Tabela 2. Charakterystyka składu ziarnowego nadawy węgla surowego

Table 2. Grain size distribution characteristics of raw coal feed

| Numer klasy | Wymiary ziarn [mm] | Udziały klas ziarnowych nadawy [%] |
|-------------|--------------------|------------------------------------|
| 1 | 0,5–1 | 35 |
| 2 | 2–5 | 30 |
| 3 | 8–20 | 35 |

Przyrost wartości produkcji w układzie 3 os. kl (rys. 6b), względem wartości produkcji w układzie 3 os. (rys. 6a), wynosi:

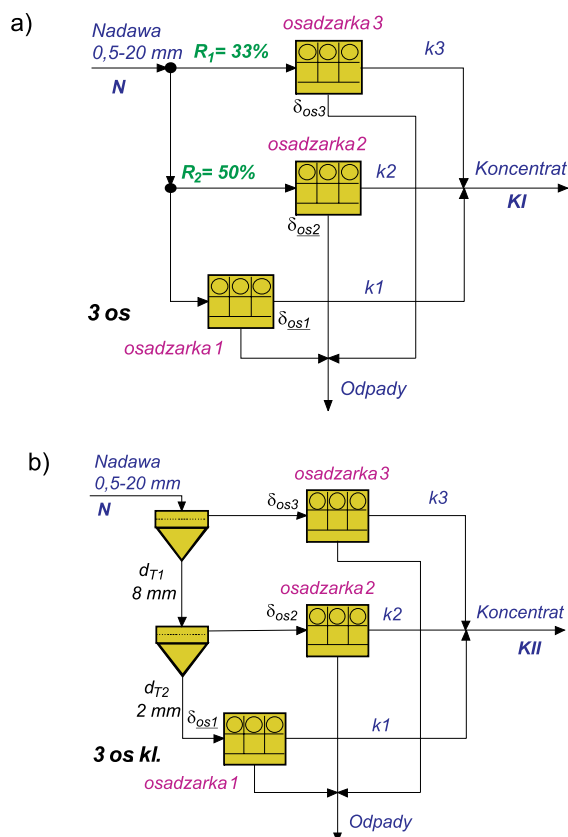
$$\Delta WP_{Ki} = [M_{Kli}(\delta_{os1}, \delta_{os2}, \delta_{os3}) - M_{Kli}(\delta_{os}, \delta_{os2}, \delta_{os3})] \cdot C_{Ki} \quad (6)$$

Suma kosztów eksploatacyjnych w osadzarkach w obydwu układach na rysunku 6 jest taka sama. Przyrost kosztów eksploatacyjnych produkcji w układzie 3 os. kl wynika z wyższych kosztów klasyfikacji od kosztów rozdzielania strumienia nadawy.

Przyrost ten jest iloczynem różnicy kosztów jednostkowych klasyfikacji i rozdzielania oraz sumy mas nadawy do klasyfikacji w dwóch przesiewaczach albo rozdzielania w dwóch rozdzielaczach (do każdej osadzarki kierowana jest 1/3 nadawy) i nie zależy od jakości koncentratu:

$$\Delta K_e = \left(M_N + \frac{2}{3} M_N \right) \cdot (K_{j_{przes}} - K_{j_{rozdz}}) \quad (7)$$

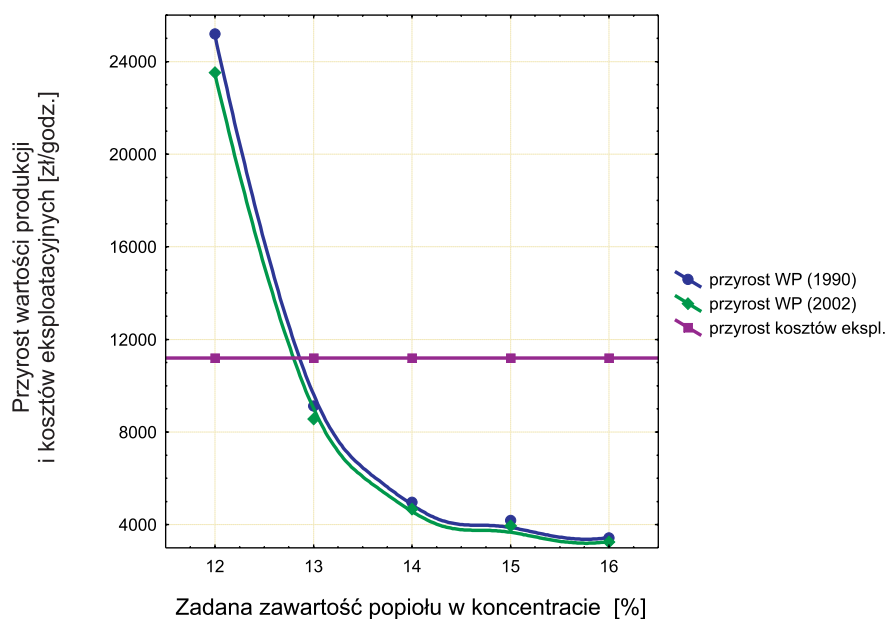
↪ $K_{j_{przes}}$, $K_{j_{rozdz}}$ – koszty jednostkowe przesiewania i rozdzielania [zł/Mg].



Rys. 6. Układy równoległego wzbogacania węgla w trzech osadzarkach: a) bez klasyfikacji wstępnej nadawy (3 os.), b) z klasyfikacją wstępna nadawy (3 os. kl)

Fig. 6. Systems of parallel 3-jig enrichment:
 a) without preliminary raw coal feed classification (3 os.)
 b) with preliminary raw coal feed classification (3 os. kl)

Na rysunku 7 pokazane zostały przyrosty wartości produkcji oraz kosztów eksploatacyjnych w układzie 3 os. kl przy założeniu, że masa nadawy to 1200 Mg/godz. (po 400 Mg/godz. do każdej osadzarki). Również tutaj zysk zakładu przeróbki węgla występuje przy mniejszych zawartościach popiołu w koncentracie końcowym. W szczegółowych obliczeniach projektowych można jeszcze uwzględnić mniejsze zużycie wody w układzie 3 os. kl – wykorzystując kaskadowo tę samą wodę można jej zaoszczędzić około 1200 m³/godz.



Rys. 7. Przyrost maksymalnej wartości produkcji przy różnych zadanych zawartościach popiołu w koncentracie końcowym (przy formułach sprzedażnych z 1990 i 2002 roku) oraz przyrost kosztów eksploatacyjnych w układzie 3 os. kl

Fig. 7. Increase in maximum production value at different demanded values of ash contents in final concentrate (at sales formulas from 1990 and 2002) and increase in system operating costs in 3-jig system with preliminary classification 3 os. kl

Podsumowanie

Bardzo ważnym zagadnieniem jest uzyskiwanie maksymalnej wartości produkcji z węgla surowego przy realizacji różnych kontraktów handlowych, dlatego istotne jest poszukiwanie nowych sposobów jej zwiększenia. W artykule przedstawiono analizy ekonomiczne wzbogacania węgla w grupach osadzarek. Analizy te przeprowadzono, porównując przyrosty wartości produkcji i przyrosty kosztów eksploatacyjnych względem odpowiedniego układu

referencyjnego. Podane wyniki prognoz efektów uzyskiwanych w rozważanych układach pozwalają stwierdzić, że ich zastosowanie jest ekonomicznie opłacalne.

Niniejsze opracowanie, dotyczące zagadnień wzbogacania wielokrotnego (wtórnego bez recykulacji i z recykulacją produktu pośredniego) wpisuje się w nurt postulowanego doskonalenia metod wzbogacania. Rozpatrzenie wzbogacania w układach osadzarek powinno być szczególnie istotne w przypadku zadań projektowych lub modernizacyjnych w zakładzie wzbogacania węgla.

Autorzy składają podziękowania Panu mgr. inż. Zygmuntowi Śmiejkowi, KOPEX GROUP – WAMAG S.A. Gliwice za udostępnienie danych, dotyczących kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych maszyn i operacji przerobczych

REFERENCES

- Bartonek, W. i Głowiak, S. 2003. Ekonomiczne aspekty eksploatacji osadzarek. *Materiały IX Konferencji Automatykacji Procesów Przeróbki Kopalni*, Szczyrk, 4–6 czerwca 2003, s. 7–21.
- Blaşchke i in., 1991 – Blaşchke, W., Mokrzycki, E. i Blaşchke, S.A. 1991. System cen na węgiel kamienny. *Przegląd Górniczy* nr 2, s. 18–26.
- Blaşchke i in., 1992 – Blaşchke, W., Mokrzycki, E., Blaşchke, S.A., Grudziński, Z. i Lorenz, U. 1992. Analiza kosztów wzbogacania węgla kamiennego w zależności od stopnia złożoności układu technologicznego. *Przegląd Górniczy* nr 11, s. 21–35.
- Blaşchke, W. i Nycz, R., 2003. Problemy produkcji czystych energetycznych węgla kamiennych. *Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej* z. 21, Inżynieria Środowiska, Koszalin, s. 755–766.
- Cierpisz, S. i Pielot, J. 2001. *Symulacyjne statyczne modele procesów i układów sterowania w zakładach wzbogacania węgla*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 28.
- Gawlik L. red., 2006. *Badania kosztów pozyskania węgla kamiennego i brunatnego w celu określenia optymalnej struktury paliwowej produkcji energii elektrycznej*. Wydawnictwo IGSMiE, Kraków.
- Głowiak S., 2009. Wpływ składu ziarnowego nadawy na skuteczność wzbogacania w osadzarkach. *Materiały XV Konferencji Automatykacji Procesów Przeróbki Kopalni*, Szczyrk, 2–4 czerwca, s. 37–50.
- Lorenz i in., 2002 – Lorenz, U., Blaşchke, W. i Grudziński, Z. 2002. Propozycja nowej formuły sprzedażnej węgla energetycznego przeznaczonego dla energetyki zawodowej. *Studia, Rozprawy, Monografie* nr 112, Wydawnictwo IGSMiE, Kraków.
- Martyniak, J. 1996. Metody maksymalizacji wychodu koncentratu węglowego. *Wiadomości Górnicze* nr 5, s. 235–240.
- Mokrzycki, E., 2001. *Rachunek kosztów w zakładzie przeróbki węgla kamiennego*. Wydawnictwo IGSMiE, Kraków.
- Pielot, J. 2004. Analiza wpływu niedokładności wzbogacania węgla na uzyskiwane efekty ekonomiczne. *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa* nr 6(401), s. 34–43.
- Pielot, J. 2009. Poprawa efektywności produkcji w strukturach o różnej konfiguracji wzbogacalników dwu-produktowych. *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa* nr 1(455), s. 32–40.
- Pielot, J. 2010a. Wielokryterialna analiza wartości produkcji w przykładowym układzie z wielokrotnym wzbogacaniem węgla. *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa* nr 2 (468), s. 11–20.
- Pielot, J. 2010b. Analiza maksymalnej wartości produkcji przy wzbogacaniu różnych klas ziarnowych węgla energetycznego w osadzarkach. *Górnictwo i Geoinżynieria* z. 4/1, Kraków, s. 217–230.
- Pielot, J. 2010c. Efekty wzbogacania węgla energetycznego w dwóch równoległych osadzarkach. *Górnictwo i Geoinżynieria* z. 4/1, Kraków, s. 231–240.

- Pielot, J. 2010d. An analysis of effects of coal jigging after changes in the grain composition of a feed. *Archives of Mining Sciences* 55(4), Kraków, p. 827–846.
- Pielot, J. 2011a. *Wielokryterialna optymalizacja produkcji układów technologicznych grup wzbogacalników grawitacyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 306, Gliwice.
- Pielot, J. 2011b. Wpływ zmian składu ziarnowego nadawy na efekty wzbogacania węgla w układach osadzarek. *Mechanizacja i Automatyzaacja Górnictwa* nr 10(488), Katowice, s. 32–39.
- Stępiński, W. 1973. *Ekonomiczna ocena procesów wzbogacania węgla i rud*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
- Śmiejek, Z. 2006. Strategia rozwoju konstrukcji polskich osadzarek – racje ekonomiczne zastosowań. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 9, z. spec., Kraków, s. 439–446.
- Venkoba Rao, B. i Kapur, P.C. 2008. Simulation of multi-stage gravity separation circuits by size-density. *International Journal of Mineral Processing* 89, p. 23–29.
- Yagun i in., 2002 – Yagun, H., Shan, L. i Maixi, L. 2002. A Profit-Oriented Expert System for Coal Washery Optimization. *Coal Preparation* 22, p. 93–107.

OCENA OPLACALNOŚCI WZBOGACANIA WĘGLA W UKŁADACH OSADZAREK

Słowa kluczowe

wzbogacanie węgla w osadzarkach, wzbogacanie wielokrotne, wzbogacanie równoległe, sterowanie procesem technologicznym, optymalizacja produkcji

Streszczenie

Procesy wzbogacania mają decydujący wpływ na zbyt produktów handlowych. Ważnym zagadnieniem jest uzyskiwanie maksymalnej wartości produkcji z węgla surowego przy różnych kontraktach handlowych. Istotne jest więc poszukiwanie nowych sposobów zwiększenia wartości produkcji.

Krzywe rozdziału osadzarek mają kształt odbiegający od idealnej krzywej, co powoduje, że w procesie wzbogacania grawitacyjnego pojawiają się ziarna błędne. Zastosowanie grupy osadzarek poprawia kształt wypadkowych krzywych rozdziału. Dzięki temu przy tej samej zadanej zawartości popiołu w koncentracie końcowym z grupy dwóch osadzarek (rys. 3): z ponownym wzbogacaniem koncentratu (2 os. K) i z recyrkulacją produktu pośredniego (2 os. rec. KO) możliwe jest uzyskanie znacząco większej wartości produkcji niż w przypadku pojedynczej osadzarki – szczególnie w przypadku małej zadanej zawartości popiołu. Wzrost wartości produkcji jest szczególnie znaczący w przypadku nadawy trudno wzbogacalnej. Oszacowanie przyrostu kosztów eksploatacyjnych (koszty inwestycyjne zostały pominięte jako nieistotne w przeliczeniu na 1 Mg węgla wzbogacanego w całym okresie eksploatacji drugiej osadzarki) pokazuje, że właśnie w przypadku małej zadanej zawartości popiołu zastosowanie drugiej osadzarki może być ekonomicznie opłacalne (rys. 5). Jeśli więc w zakładzie wzbogacania znajduje się więcej osadzarek, to celowym działaniem jest odpowiednie ich wykorzystanie, poprzez zastosowanie wzbogacania wtórnego lub z recyrkulacją produktu pośredniego.

Gdy osadzarka ma zbyt małą wydajność w stosunku do ilości węgla surowego, wtedy stosuje się wzbogacanie równoległe w dwóch lub trzech osadzarkach (układ 3 os. na rys. 6a). W przypadku różnych klas ziarnowych nadawy krzywe rozdziału mają różny kształt (rys. 2), dlatego efekty wzbogacania są różne w poszczególnych klasach ziarnowych. Z tego powodu celowe jest wzbogacanie w układzie równoległym z rozdzielaniem klas ziarnowych (układ 3 os. kl na rys. 6b), a więc ze

wstępną klasyfikacją. W takim przypadku możliwy jest dobór gęstości rozdziału w poszczególnych osadzarkach, maksymalizujący wychód koncentratu o zadanej jakości. Maksymalizowana jest więc wartość produkcji. Wartość ta jest większa niż w układzie referencyjnym 3 os., zwłaszcza przy małej zadanej zawartości popiołu oraz w przypadku nadawy trudno wzbogacalnej.

W układach osadzarek możliwe jest uzyskanie mniejszej minimalnej zadanej zawartości popiołu w koncentracie niż w przypadku układów referencyjnych (1 os. lub 3 os.).

Niniejsze opracowanie, dotyczące zagadnień wzbogacania wielokrotnego (wtórnego bez recykulacji i z recykulacją produktu pośredniego), wpisuje się w nurt postulowanego doskonalenia metod wzbogacania. Rozpatrzenie wzbogacania w układach osadzarek powinno być szczególnie istotne w przypadku zadań projektowych lub modernizacyjnych w zakładzie wzbogacania węgla.

COAL CLEANING IN JIG SYSTEMS – PROFITABILITY ASSESSMENT

Key words

coal jigging, multi-stage enrichment, parallel enrichment, technological process control, production optimization

Abstract

Coal preparation processes have a decisive impact on sales of commercial products. Obtaining the maximum production value from raw coal at different commercial contracts is an important issue. It is therefore important to search for new ways of increasing the production value.

Jigs partition curves have a shape deviating from the ideal curve, which causes the appearance of incorrect grains in the process of coal enrichment. Application of a group of jigs improves the shape of the resultant partition curve. With the same demanded value of ash content in the final concentrate from a group of two jigs (Fig. 3) with the repeated concentrate enrichment (2 os. *K*) and with the recirculation of intermediate product (2 os. *rec. KO*), it is possible to significantly increase the production value when compared to the case of a single jig – particularly in the case of a demanded low value of ash content.

Estimating the increase in operating costs (investment costs have been omitted as irrelevant per 1 Mg of enriched coal over the second jig lifetime) shows that – particularly in the case of a low demanded value of ash content – application of the second jig can remain economically profitable (Fig. 5). Thus, if the coal preparation plant has more jigs, the advisable action is their suitable use through the application of secondary enrichment or intermediate product recirculating.

When the jig has too low productivity relative to the amount of the raw coal, the enrichment is performed using two or three jigs (3 os. system in Fig. 6a). In the case of different raw coal feed size classes, jig partition curves have different shapes (Fig. 2), so the cleaning effects are different in individual grain size classes. For this reason, it is advisable to enrich coal in the parallel arrangement with separation of grain size classes (system 3 os. *kl* in Fig. 6b), i.e. with initial classification. In this case it is possible to select partition densities for individual jigs to maximize the desired quality concentrate yield. In this way, the production value can be maximized. This value is higher than in the case of the reference arrangement (3 os.), particularly at a low demanded ash content value and in the case of hardly-washable raw coal feed.

With jig-systems it is possible to obtain a lower minimum desired ash content in concentrate than in the case of the reference arrangements (*1 os.* or *3 os.*)

This paper, concerning issues of repeated enrichment (secondary without recirculation and with recirculation of an intermediate product), supports the trend of demanded improvement of enrichment methods. Analysis of jig cleaning systems should be particularly important in the case of design or upgrading tasks in coal preparation plants.