



Poprawa dokładności wzbogacania węgla kamiennego w cyklonach ze wzbogacaniem wtórnym

Joachim PIELOT¹⁾

¹⁾ dr hab. inż. prof. nzw.; Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa, Akademicka 2, 41-100 Gliwice, email: joachim.pielot@polsl.pl

DOI: 10.29227/IIM-2017-02-14

Streszczenie

Przedstawione zostały zagadnienia wzbogacania wtórnego węgla kamiennego w cyklonach wzbogacających bez rozdrabniania koncentratu pośredniego. Omówiono krzywe rozdziału cyklonów wykorzystywane do modelowania procesu wzbogacania. W szczególności zilustrowano efekt poprawy kształtu krzywych rozdziału w układach z dwoma i trzema cyklonami, co przekłada się bezpośrednio na poprawę dokładności wzbogacania. W cyklonach z cieczą ciężką dokładność wzbogacania jest jednak na tyle dobra, że ponowne wzbogacanie koncentratu przejściowego praktycznie nic nie daje. Wartość produkcji jest tylko minimalnie większa; stosowanie wzbogacania wtórnego w układach z cyklonami z cieczą ciężką jest nieopłacalne ekonomicznie. Inaczej jest w przypadku cyklonów wodnych; w układach ze wzbogacaniem wtórnym można uzyskać większą wartość produkcji o zadanej jakości.

Słowa kluczowe: krzywe rozdziału, wtórne wzbogacanie węgla w cyklonach, optymalizacja produkcji

Wstęp

Procesy przeróbki węgla pozwalają uzyskiwać różną ilość i jakość produktów. Wpływ na te parametry ma skład ziarnowy i wzbogalność węgla surowego, rodzaj operacji przerobczych w układzie technologicznym przeróbki węgla, parametry rozdziału tych operacji oraz niedokładność wzbogacania poszczególnych wzbogalników. Niedokładność wzbogacania wynika z faktu, że proces wzbogacania nie przebiega idealnie, czego skutkiem jest nieidealny kształt krzywych rozdziału (Cierpisz, Pielot 2001, Goodman, McCreery 1980, Pielot 2011), za pomocą których modelowany jest proces wzbogacania we wzbogalnikach grawitacyjnych. Przy idealnym wzbogacaniu wszystkie ziarna o gęstościach mniejszych od gęstości rozdziału trafiałyby do koncentratu, ziarna o gęstości większej opadałyby i stanowiły odpady, nie byłoby zatem ziarn błędnych. Kształt idealnej krzywej rozdziału zilustrowany jest na rys. 1. Kształt krzywych rozdziału wzbogalników grawitacyjnych odbiega od idealnego i zależy rodzaju wzbogalnika oraz od wielkości ziarn. W przypadku najmniejszych ziarn jest najgorszy; im ziarna większe, tym kształt krzywych jest lepszy, a dokładność wzbogacania poprawia się.

Krzywe rozdziału cyklonów wzbogacających

W układach technologicznych wzbogacania węgla stosuje się cyklony wzbogacające: z cieczą ciężką i wodne (Blaschke i in. 2006, Holuszko 2016, Yagun i in. 2002). W cyklonach z cieczą ciężką wzbogaca się węgiel surowy o wymiarach ziarn od ok. 0,6 do

kilkunastu, kilkudziesięciu milimetrów, a w cyklonach wodnych ziarna poniżej ok. 0,75 mm.

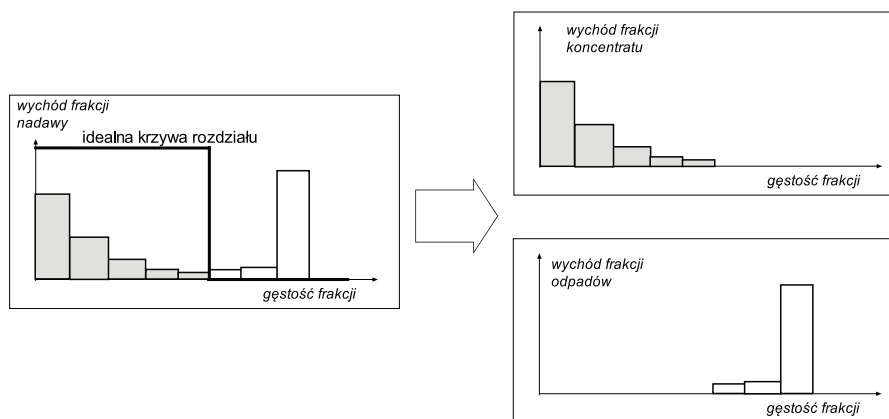
W pracy rozpatrzone zostały efekty wzbogacania w cyklonach wzbogacających i w układach dwóch i trzech cyklonów. Na rys. 2 i 3 zostały przedstawione zespoły krzywych rozdziału dla tych dwóch rodzajów cyklonów, gdzie zredukowana gęstość rozdziału jest w przybliżeniu ilorazem gęstości frakcji nadawy i gęstości rozdziału (Pielot 2011, s.59). Krzywe rozdziału wzbogalników z cieczą ciężką są najbardziej zbliżone kształtem do krzywej idealnej, w przypadku cyklonów wodnych kształt krzywych znacząco odbiega od krzywej idealnej (inne są zakresy liczbowe osi gęstości na rys. 2 i 3).

Wzbogacanie wtórne węgla kamiennego

W przeróbce kopaliny, gdy udział składnika użytecznego jest niewielki oraz występują liczne wprysnięcia i zrosty z ziarnami skały płonnej, stosuje się wzbogacanie wielostopniowe i wzbogacanie wtórne produktów przejściowych wraz z uprzednim rozluźnianiem ziarn poprzez kruszenie¹.

Pod pojęciem wzbogacania wtórnego rozumie się zasadniczo ponowne wzbogacanie produktu przejściowego, będącego zrostami składnika użytecznego i skały płonnej. Przed ponownym wzbogacaniem produkt przejściowy jest najczęściej kruszony w celu rozdzielenia ziarn kopaliny użytecznej (która bardzo często występuje w postaci ziarn wprysniętych) i skały płonnej (Blaschke i in. 2006, s.156–157). W przypad-

¹ W procesach flotacji rud metali stosuje się ponowne wzbogacanie części produktów (Trybalski 1996), czyli recykulację produktów; również w przypadku flotacji węgla możliwe jest uzyskanie optymalnych wyników wzbogacania poprzez zastosowanie odpowiedniej konfiguracji flotowników i recykulacji produktów (Kalinowski 1997, Kalinowski 2000, Kalinowski 2007).



Rys. 1. Ilustracja procesu idealnego wzbogacania grawitacyjnego

Fig. 1. Illustration of an ideal gravity separation process

ku węgla kamiennego, gdy proporcje substancji organicznej palnej i substancji mineralnej w zrostach mogą być porównywalne, oprócz wzbogacania wtórnego z rozdrabnianiem można stosować również najprostszą postać wzbogacania wtórnego bez rozdrabniania². Przy wzbogacaniu trójproduktowym produkt przejściowy może być wzbogacany bezpośrednio po opuszczeniu wzbogacalnika, w stanie naturalnym, jest więc nazywany naturalnym produktem przejściowym. Jest on oczywiście materiałem trudno wzbogacalnym, co skutkuje względnie małą efektywnością rozdziału, szczególnie przy wzbogacaniu bez poprawienia dokładności, gdy jest on ponownie wzbogacany w tego samego typu wzbogacalniku. Aby zwiększyć dokładność, naturalny produkt przejściowy może (a nawet powinien) być wzbogacany we wzbogacalniku o większej dokładności wzbogacania – np. produkt przejściowy z osadzarki powinien być wzbogacany w cyklonie z cieczą ciężką (Martyniak 1996, s. 237), co było przedmiotem analizy ilościowej (Pielot 2015b). Możliwe jest także zastosowanie recyrkulacji naturalnego produktu przejściowego, przy wzbogacaniu we wzbogacalniku trójproduktowym bądź w dwóch wzbogacalnikach dwuproduktowych. Poprawa skuteczności wzbogacania, wynikająca w takim przypadku z przedłużenia czasu wzbogacania, wyraża się mniejszą ilością ziarn błędnych w koncentracie i odpadach (Martyniak 1996, s.237), co również było przedmiotem analiz ilościowych w układach z dwiema osadzarkami dwuproduktowymi (Pielot 2011, Pielot 2015c, Pielot 2016).

W dotychczasowych publikacjach autor ograniczył się zasadniczo tylko do analizy efektów możliwych do osiągnięcia w układach grup osadzarek (Pielot 2009, Pielot 2010a Pielot 2010b, Pielot 2011, Pielot 2015a), gdyż, zwłaszcza w warunkach krajowych, są one na-

częściej stosowanymi maszynami wzbogacającymi, a ich krzywe rozdziału mają kształt pośredni między krzywymi rozdziału wzbogacalników z cieczą ciężką a krzywymi rozdziału cyklonów wodnych. Bibliografia dotycząca wzbogacania wtórnego nie jest bogata. Do opracowań, gdzie podjęte są w jakimś stopniu zagadnienia grawitacyjnego wzbogacania wtórnego zaliczyć można (Lenartowicz i in. s.139, Pielot 2011, Salama i in. 1994, s.48, Venkoba, Kapur 2008, Yagun i in. 2002). Tutaj przedstawione są analizy dotyczące układów z wtórnym (posobnym) wzbogacaniem w cyklonach wzbogacających. Analiza układów wzbogacania z recyrkulacją produktu przejściowego z cyklonami wodnymi (Holuszko 2016), będzie przedmiotem innego opracowania.

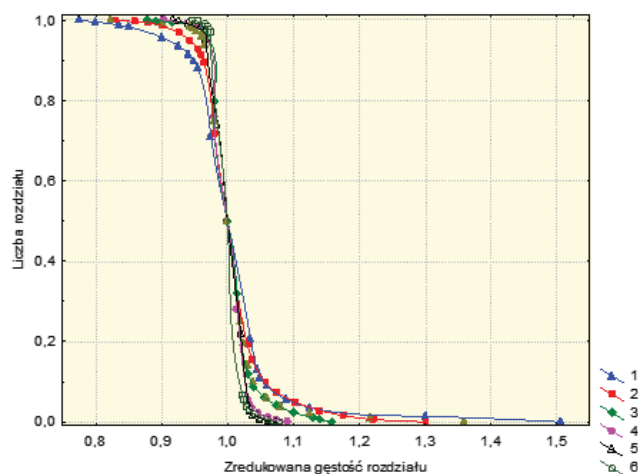
Krzywe rozdziału przy wzbogacaniu wtórnym

Jak już we wstępie wspomniano, gdyby proces rozdziału strugi nadawy węgla surowego we wzbogacalniku grawitacyjnym przebiegał idealnie, wtedy wszystkie ziarna o gęstości mniejszej od gęstości rozdziału trafiłyby do koncentratu, a wszystkie ziarna o gęstości większej stanowiłyby odpady. Wtedy idealna krzywa rozdziału miałaby charakter skokowy jak na rys. 1. Liczby rozdziału dla koncentratu $f(\delta)$ przyjmowałyby tylko dwie wartości, zależnie od gęstości δ elementarnych frakcji nadawy i gęstości rozdziału δ_{50} :

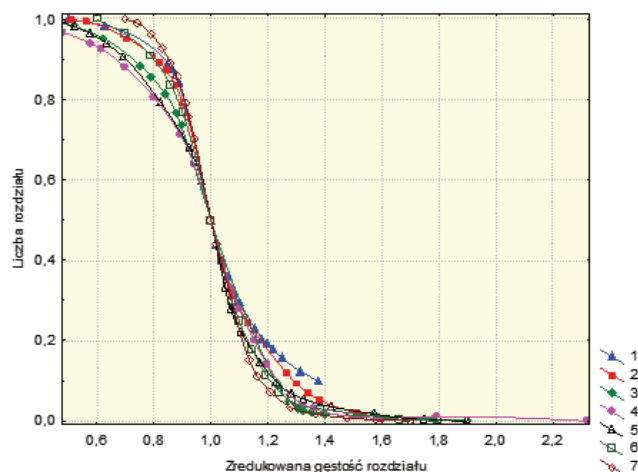
$$\begin{aligned} f(\delta) &= 1 & \text{dla } \delta \leq \delta_{50} \\ f(\delta) &= 0 & \text{dla } \delta > \delta_{50} \end{aligned} \quad (1)$$

Rzeczywiste procesy wzbogacania nie są idealne, dlatego rzeczywista krzywa rozdziału ma kształt odbiegający od krzywej idealnej (Cierpisz, Pielot 2001, s. 70, Goodman, McCreery 1980, Pielot 2011,

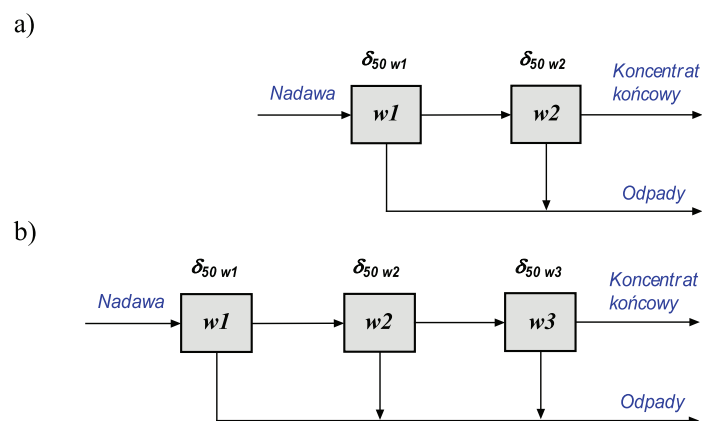
² Użytkownicy zamawiający mniejsze ilości węgla energetycznego niż energetyka zawodowa wysuwają wymagania, które dotyczą składu ziarnowego sortymentów handlowych. Kotły centralnego ogrzewania z rusztem mechanicznym oraz kotły małej i średniej mocy wymagają nie tylko węgla wzbogaczonego, lecz również węgla o określonym składzie ziarnowym, niezawierającego nadziarna i podziarna (Ściążko, Dreszer 1996, s. 93). W niektórych więc przypadkach wskazane może być pominięcie kruszenia, celem uniknięcia podziarna.



Rys. 2. Krzywe rozdziału cyklonu z cieczą ciężką; 1 – 6 numery klas nadawy, dla których zidentyfikowano krzywe rozdziału
Fig. 2. Partition curves of a heavy medium cyclon; 1 – 6 numbers of feed classes for which partition curves were identified



Rys. 3. Krzywe rozdziału cyklonu wodnego; 1 – 7 numery klas nadawy, dla których zidentyfikowano krzywe rozdziału
Fig. 3. Partition curves of a water only cyclon; 1 – 7 numbers of feed classes for which partition curves were identified



Rys. 4. Układy dwóch i trzech wzbogacalników z wtórnym wzbogacaniem koncentratów przejściowych: a) 2 w. K, a) 3 w. KK
Fig. 4. Systems of two and three separators with secondary enrichment of intermediate concentrates: a) 2 w. K, a) 3 w. KK

s. 60) i dla koncentratu węglowego jest krzywą ciągłą monotonicznie malejącą. Liczby rozdziału, dotyczące poszczególnych, elementarnych frakcji węgla wyznacza się z krzywej rozdziału w zależności od gęstości tychże frakcji. Liczba rozdziału $f(\delta)$ określa statystycznie prawdopodobieństwo przejścia ziarna nadawy o konkretnej gęstości do koncentratu. W ujęciu ilościowym oznacza względny udział danej, elementarnej frakcji gęstościowej w koncentracie. Natomiast różnica $1-f(\delta)$ określa jaka część ziarn danej frakcji gęstościowej trafi do odpadów. 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. Gęstość rozdziału definiuje się jako gęstość elementarnej frakcji węgla, która w 50% przechodzi do koncentratu i w 50% do odpadów.

W autorskim modelu symulacyjnym procesów przeróbki węgla (Cierpisz, Pielot 2001, s. 68–72, Pielot 2011, s. 57–63), wykorzystane zostały krzywe rozdziału określone dla koncentratu, których współrzędne punktów podane zostały w postaci tabelarycznej (Goodman, McCreery 1980). Ponieważ przebieg procesów wzbogacania grawitacyjnego zależy również od wymiarów ziarn, dlatego w modelu matematycznym dla poszczególnych operacji wzbogacania określonych jest po kilka krzywych rozdziału (od 4 do 7), zidentyfikowanych dla odpowiednich klas ziarnowych, co zwiększa dokładność prognoz symulacyjnych. Sposób wyznaczania liczb rozdziału w danej klasie ziarnowej nadawy, dla konkretnych, elementarnych frakcji gęstościowych nadawy podany jest w monografiach (Cierpisz, Pielot 2001, s. 68–71, Pielot 2011, s. 62). Gdy nadawa nie ma określonej charakterystyki składu ziarnowego, wtedy model każdej operacji wzbogacania grawitacyjnego ma postać jednej uśrednionej krzywej rozdziału.

Na rys. 4 przedstawione są dwie konfiguracje wzbogacalników ze wzbogacaniem wtórnym. W układzie z rys. 4.a koncentrat z pierwszego wzbogacalnika jest produktem przejściowym i ponownie jest wzbogacany w drugim wzbogacalniku. Dla danej klasy ziarnowej i oraz frakcji gęstościowej j nadawy we wzbogacalniku pierwszym $w1$, pracującym z gęstością rozdziału $\delta_{50\ w1}$ liczba rozdziału przyjmuje wartość $f_{ij\ w1}(\delta_{50\ w1})$. Liczba ta wyraża prawdopodobieństwo, z jakim ziarno nadawy o gęstości frakcji j przechodzi do koncentratu, a ilościowo oznacza wychód frakcji gęstościowej j w koncentracie. Koncentrat przejściowy jest następnie wzbogacany w drugim wzbogacalniku $w2$ z gęstością rozdziału $\delta_{50\ w2}$, a liczba rozdziału przyjmuje teraz wartość $f_{ij\ w2}(\delta_{50\ w2})$.

Prawdopodobieństwo, że dane ziarno znajdzie się w koncentracie końcowym, pod warunkiem, że wcześniej znalazło się w koncentracie przejściowym z pierwszego wzbogacalnika $w1$, jest więc prawdopodobieństwem warunkowym i wyraża się iloczynem obydwu wyznaczonych liczb rozdziału. Prawdopodobieństwo to, a więc wypadkową – zastępczą liczbę rozdziału $f_{ij\ zastIIIk}$ dla ziarn z klasy ziarnowej i oraz frakcji gęstościowej j nadawy określić można z zależności:

$$f_{ij\ zastIIIk} = f_{ij\ w1}(\delta_{50\ w1}) \cdot f_{ij\ w2}(\delta_{50\ w2}) = \left[\sum_{l=1}^{m_i} f_{lj\ w1}(\delta_{50\ w1}) \cdot u_{li} \right] \cdot \left[\sum_{l=1}^{m_i} f_{lj\ w2}(\delta_{50\ w2}) \cdot u_{li} \right] \quad (2)$$

gdzie:

$f_{ij(\delta 50)}$ – liczba rozdziału frakcji gęstościowej j w klasie ziarnowej i nadawy,

$f_{lj(\delta 50)}$ – liczba rozdziału frakcji gęstościowej j w klasie ziarnowej l , w której określono krzywą rozdziału modelu wzbogacalnika,

u_{li} – udział klasy ziarnowej l , w której określono krzywą rozdziału, w klasie ziarnowej i nadawy,

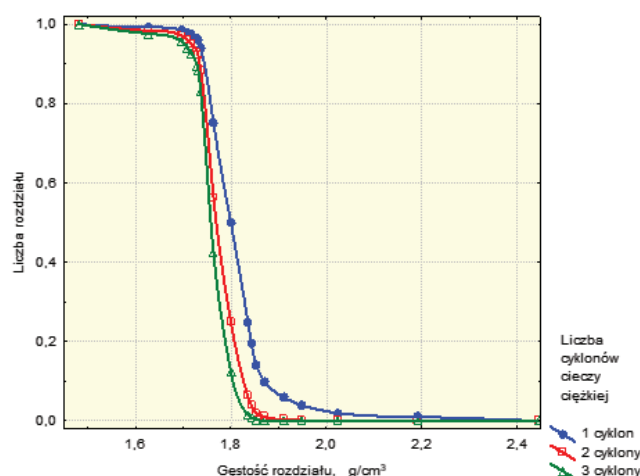
m_i – liczba klas ziarnowych modelu wzbogacalnika, w których określono krzywe rozdziału, zawierających się całkowicie lub częściowo w klasie ziarnowej i nadawy.

W układzie z rys. 4b koncentrat z drugiego wzbogacalnika $w2$ jest drugim koncentratem przejściowym i ponownie jest wzbogacany w trzecim wzbogacalniku $w3$ z gęstością rozdziału $\delta_{50\ w3}$. Liczba rozdziału przyjmuje wartość $f_{ij\ w3}(\delta_{50\ w3})$. Zastępcza liczba rozdziału $f_{ij\ zastIIIk}$ dla ziarn z klasy ziarnowej i oraz frakcji gęstościowej j nadawy w przypadku koncentratu końcowego jest iloczynem trzech liczb rozdziału:

$$f_{ij\ zastIIIk} = f_{ij\ w1}(\delta_{50\ w1}) \cdot f_{ij\ w2}(\delta_{50\ w2}) \cdot f_{ij\ w3}(\delta_{50\ w3}) = \left[\sum_{l=1}^{m_i} f_{lj\ w1}(\delta_{50\ w1}) \cdot u_{li} \right] \cdot \left[\sum_{l=1}^{m_i} f_{lj\ w2}(\delta_{50\ w2}) \cdot u_{li} \right] \cdot \left[\sum_{l=1}^{m_i} f_{lj\ w3}(\delta_{50\ w3}) \cdot u_{li} \right] \quad (3)$$

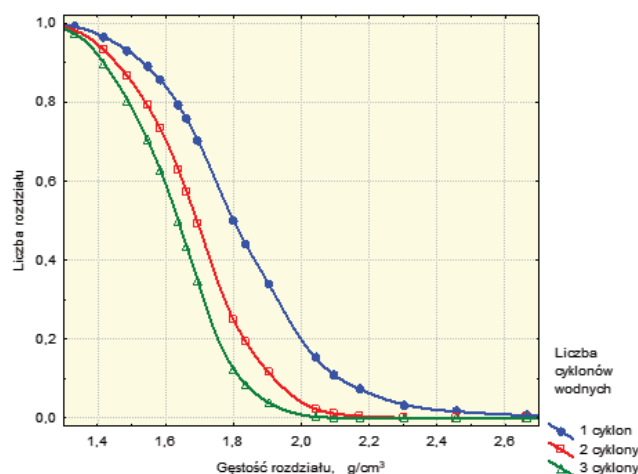
Do wyznaczenia zastępczych liczb rozdziału (oraz do optymalizacji produkcji) rozpatrzone zostały układy: z jednym cyklonem – jako układem referencyjnym – oraz układy z dwoma i trzema cyklonami. Na rys. 5 i 6 podane są krzywe rozdziału, dotyczące pojedynczych cyklonów z cieczą ciężką i cyklonów wodnych oraz krzywe wypadkowe, uzyskiwane w układach z dwoma i trzema cyklonami.

Wypadkowe liczby rozdziału zostały wyznaczone przy założeniu tej samej gęstości rozdziału odpowiednio w dwóch albo trzech cyklonach. Jeśli przykładowo liczba rozdziału w każdym wzbogacalniku dla pewnej frakcji nadawy o gęstości mniejszej od gęstości rozdziału wynosi 0,900, to w układzie z dwoma wzbogacalnikami $f_{ij\ zastII} = 0,900 \cdot 0,900 = 0,810$, a w układzie z trzema wzbogacalnikami $f_{ij\ zastIII} = 0,900 \cdot 0,900 \cdot 0,900 = 0,729$. Wypadkowe liczby rozdziału w obydwu układach przy gęstości frakcji równej gęstości



Rys. 5. Uśrednione krzywe rozdziału w cyklonach z cieczą ciężką z wtórnym wzbogacaniem koncentratu przejściowego

Fig. 5. Averaging partition curves in heavy media cyclones with secondary enrichment of an intermediate concentrate



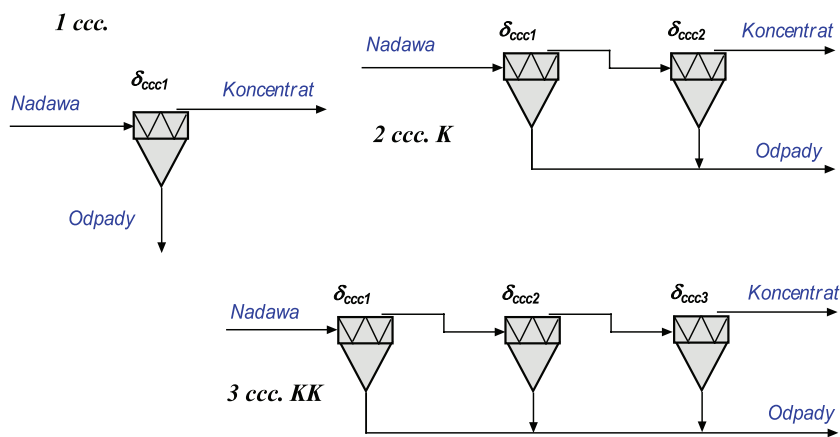
Rys. 6. Krzywe rozdziału w cyklonach wodnych z wtórnym wzbogacaniem koncentratu przejściowego dla klasy ziarnowej modelu cyklonu $>0,47$ mm

Fig. 6. Partition curves of water cyclones with secondary enrichment of an intermediate concentrate for grain class of cyclone model: $>0,47$ mm

rozdziłu wynoszą odpowiednio: 0,250 ($0,500^2$) oraz 0,125 ($0,500^3$). W przypadku frakcji nadawy o gęstości większej od gęstości rozdziłu, gdy liczba rozdziłu w każdym wzbogacalniku wynosi np. 0,100 wypadkowe liczby rozdziłu wynoszą odpowiednio: 0,010 ($0,100^2$) oraz 0,001 ($0,100^3$). Wypadkowe liczby rozdziłu są więc zawsze mniejsze od liczb rozdziłu w jednym wzbogacalniku, a efekt ten jest tym większy, im większa jest gęstość frakcji nadawy. Ponieważ więc wypadkowe liczby rozdziłu szybciej maleją przy większych gęstościach frakcji nadawy, dlatego kształt wypadkowych krzywych rozdziłu jest bardziej zbliżony do krzywej idealnej, poprawia się zatem dokładność wzbogacania. Efekt poprawy kształtu krzywych rozdziłu jest największy w przypadku dwóch wzbogacalników. Trzeci wzbogacalnik oczywiście również poprawia kształt krzywej, niemniej uzyskiwany efekt nie jest już

tak duży. Wypadkowe krzywe rozdziłu przesuwają się w kierunku mniejszych gęstości, również wypadkowa gęstość rozdziłu wyraźnie się zmniejsza. Aby uzyskać w koncentracie końcowym zadaną zawartość popiołu należy zwiększyć gęstość rozdziłu w każdym wzbogacalniku, w stosunku do gęstości rozdziłu w układzie z pojedynczym wzbogacalnikiem. Zwiększenie gęstości rozdziłu powoduje wzrost wychodu koncentratu końcowego, a więc i wzrost wartości produkcji, co przedstawione jest w następnym punkcie.

W rozpatrzonych tutaj przykładach (rys. 5 i 6) przyjęte zostały te same wartości gęstości rozdziłu ($1,8 \text{ g/cm}^3$) odpowiednio w jednym, dwóch albo trzech cyklonach. Przyjęcie tych samych gęstości rozdziłu jest rozwiązaniem optymalnym. Jeśli w poszczególnych wzbogacalnikach gęstości rozdziłu będą inne, wtedy oczywiście inną wartość przyjmować będą wypad-



Rys. 7. Układy cyklonów z cieczą ciężką: jeden cyklon (1 ccc.) oraz układy z ponownym wzbogacaniem koncentratu przejściowego (2 ccc.K, 3 ccc.KK)

Fig. 7. Systems of heavy media cyclones: one cyclone (1 ccc.) and systems with re-enrichment of intermediate concentrate (2 ccc.K, 3 ccc.KK)

kowe liczby rozdziału oraz inny, gorszy kształt uzyskają wypadkowe krzywe rozdziału (Pielot 2011, s. 113–114).

Krzywe rozdziału we wzbogacalnikach z cieczą ciężką są najbardziej zbliżone kształtem do krzywej idealnej. W układach z dwoma i trzema cyklonami z ponownym wzbogacaniem koncentratu przejściowego wypadkowe krzywe rozdziału mają więc tylko w niewielkim stopniu poprawiony kształt (rys. 5). Należy się zatem liczyć tylko z niewielkim przyrostem wartości produkcji w stosunku do wartości uzyskiwanej w układzie z pojedynczym cyklonem.

Z kolei cyklony wodne charakteryzują się o wiele gorszym kształtem krzywych rozdziału. W układach z dwoma i trzema cyklonami wodnymi z ponownym wzbogacaniem koncentratu przejściowego wypadkowe krzywe rozdziału mają więc znacznie poprawiony kształt (rys. 6). Można się zatem spodziewać dużego przyrostu wartości produkcji w stosunku do wartości uzyskiwanej w układzie z pojedynczym cyklonem.

Optimalizacja wartości produkcji przy wzbogacaniu wtórnym w cyklonach

Wzbogacanie wtórne ma rację bytu zasadniczo przy węglu trudno wzbogalnym, dlatego ograniczono się tutaj do rozpatrzenia tylko takiego przypadku. Charakterystyki gęstościowo-jakościowe nadawy podane są w tabeli 1 w pracy (Pielot 2017).

Aby wykazać jak może zmieniać się maksymalna wartość produkcji o zadanej jakości koncentratu w układach ze wzbogacaniem wtórnym, rozpatrzone zostaną efekty wzbogacania w trzech układach z cyklonami z cieczą ciężką, a następnie w trzech układach z cyklonami wodnymi. Na rys. 7 przedstawione są układy wzbogacania z cyklonem z cieczą ciężką oraz dwoma (2 ccc. K) i trzema takimi cyklonami (3 ccc. KK).

Założono, że wartość produkcji jest iloczynem masy koncentratu i jego ceny jednostkowej, wyznaczonej z 4. wersji formuły sprzedażnej z 2002 r. (Lorenz

i in. 2002). Jako poziom odniesienia przyjęto maksymalną wartość produkcji (100%), uzyskiwaną z pojedynczego cyklonu w układzie referencyjnym 1 ccc. Wartość produkcji (WP), określona jest w układach z rys. 7, zależnie od liczby cyklonów, odpowiednim wyrażeniem:

$$WP_i(\delta_{ccc1}) = M_{Ki}(\delta_{ccc1}) \cdot C_{Ki}(\delta_{ccc1}) \quad (4a)$$

$$WP_i(\delta_{ccc1}, \delta_{ccc2}) = M_{Ki}(\delta_{ccc1}, \delta_{ccc2}) \cdot C_{Ki}(\delta_{ccc1}, \delta_{ccc2}) \quad (4b)$$

$$WP_i(\delta_{ccc1}, \delta_{ccc2}, \delta_{ccc3}) = M_{Ki}(\delta_{ccc1}, \delta_{ccc2}, \delta_{ccc3}) \cdot C_{Ki}(\delta_{ccc1}, \delta_{ccc2}, \delta_{ccc3}) \quad (4c)$$

Dla każdego z trzech układów maksymalizowana jest odpowiednia wersja funkcji (4):

$$\max WP_i$$

przy ograniczeniu równościowym zawartości popiołu w koncentracie:

$$A_K = A_{Ki}, \quad (5)$$

przy kolejnych wartościach A_{Ki} , zadawanych z krokiem 1%,

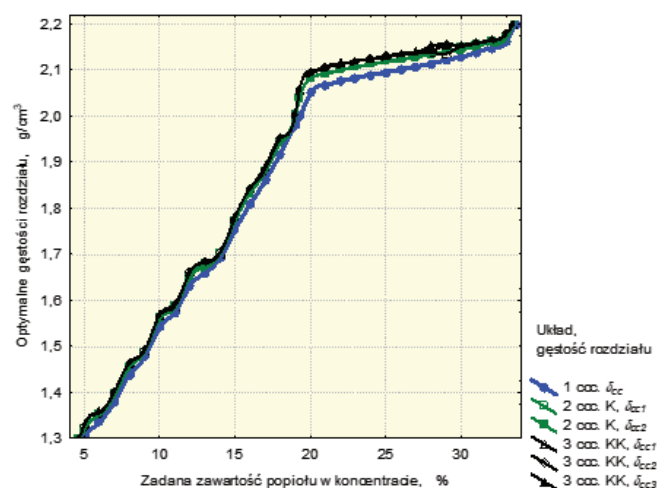
gdzie:

δ_{ccc} – gęstości rozdziału w cyklonach z cieczą ciężką [g/cm^3],

M_K – masa koncentratu (np. w ciągu godziny lub zmiany) [Mg],

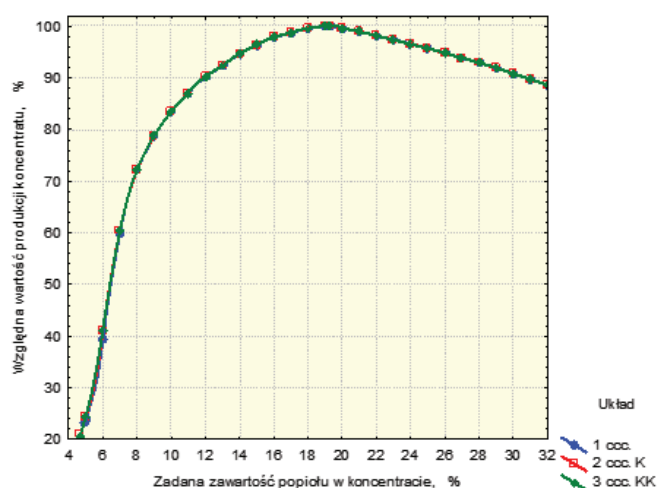
C_{Ki} – cena jednostkowa koncentratu [zł/Mg].

Zmiennymi decyzyjnymi w algorytmie maksymalizacji produkcji, opisanym w (Cierpisz, Pielot 2001, s. 97–110, Pielot 2011, s. 82–90), są jedna, dwie albo trzy gęstości rozdziału w cyklonach z cieczą ciężką. Przyjęto dopuszczalny zakres gęstości rozdziału w przedziale $1,300 \div 2,200 \text{ g}/\text{cm}^3$.



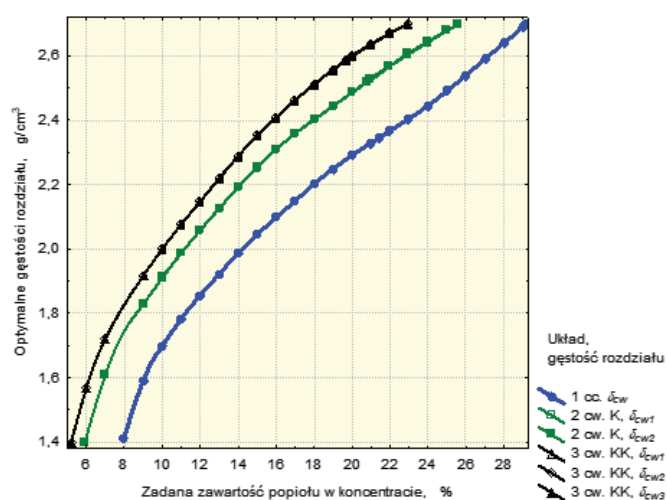
Rys. 8. Optymalne gęstości rozdziału w jednym cyklonie z cieczą ciężką (*1 cc.*) i w układach z ponownym wzbogacaniem koncentratu przejściowego (*2 cc.K*, *3 cc.KK*)

Fig. 8. Optimum separation densities in one heavy media cyclone (*1 cc.*) and systems of re-enrichment of intermediate concentrate (*2 cc.K*, *3 cc.KK*)



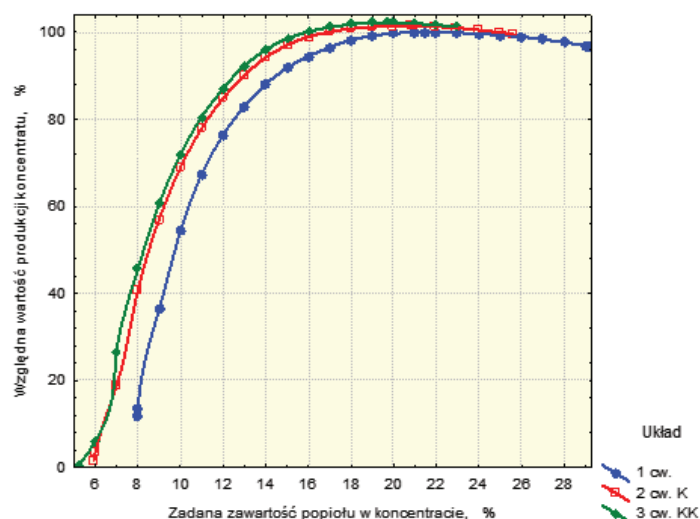
Rys. 9. Maksymalna wartość produkcji przy różnych zawartościach popiołu w koncentracie końcowym w układach cyklonów z cieczą ciężką

Fig. 9. Maximum production value at different ash contents in final concentrate in systems of heavy media cyclones



Rys. 10. Optymalne gęstości rozdziału w jednym cyklonie wodnym (*1 cw.*) i w układach z wtórnym wzbogacaniem koncentratu przejściowego (*2 cw. K* i *3 cw. KK*)

Fig. 10. Optimum separation densities in one water cyclone (*1 cw.*) and systems with secondary enrichment of intermediate concentrate (*2 cw. K* i *3 cw. KK*)



Rys. 11. Maksymalna wartość produkcji przy różnych zawartościach popiołu w koncentracie końcowym w układach cyklonów wodnych

Fig. 11. Maximum production value at different ash contents in final concentrate in systems of water cyclones

Wyniki obliczeń optymalizacyjnych przedstawione są na kolejnych dwóch rysunkach. Rysunek 8 ilustruje dobrane optymalnie gęstości rozdziału w cyklonach z cieczą ciężką.

Gęstości rozdziału przy ponownym wzbogacaniu koncentratu przejściowego (koncentratów przejściowych) – w układach 2 ccc.K i 3 ccc.KK – mają w obydwu bądź we wszystkich trzech cyklonach każdorazowo (przy każdej zadanej zawartości popiołu w koncentracie) identyczną wartość. Występuje tu więc efekt doboru takich samych wartości gęstości rozdziału w dwóch lub trzech cyklonach, gdyż wtedy wypadkowe krzywe rozdziału mają kształt najbardziej zbliżony do idealnego i dokładność wzbogacania jest najlepsza (Pielot 2011, s. 114). Odpowiednie krzywe gęstości rozdziału dla układów 2 ccc.K i 3 ccc.KK nakładają się na siebie. We wszystkich trzech układach z cyklonami z cieczą ciężką każdorazowo uzyskiwana jest niemal identyczna wartość produkcji – rys. 9. Tylko przy najmniejszych zawartościach popiołu w koncentracie końcowym wartość produkcji różni się o rząd dziesiątych części procenta na korzyść układów ze wzbogacaniem wtórnym. Stąd wypływa oczywisty wniosek, że układy dwóch albo trzech wzbogacalników z cieczą ciężką ze wzbogacaniem wtórnym koncentratu przejściowego w praktycznym zastosowaniu są ekonomicznie zupełnie nieopłacalne. Bardzo niewielki przyrost wartości produkcji nie jest w stanie skompensować kosztów inwestycyjnych i dodatkowych kosztów eksploatacyjnych.

Tak jak dla cyklonów z cieczą ciężką rozpatrzone zostały analogiczne układy wzbogacania w cyklonach wodnych, nazwane odpowiednio: 1 cw, 2 cw.K i 3 cw.KK. Przyjęto dopuszczalny zakres gęstości roz-

ziału δ_{cw1} , δ_{cw2} i δ_{cw3} w przedziale 1,300÷2,700 g/cm³. Prognozy gęstości rozdziału i wartości produkcji wykonane zostały z wykorzystaniem tego samego algorytmu maksymalizacji produkcji. Na rys. 10 zilustrowane są dobrane optymalnie gęstości rozdziału w tych układach. Wskutek małej dokładności wzbogacania w cyklonach wodnych dobrane gęstości rozdziału w trzech układach dość znacznie się różnią (ale są takie same w układzie z dwoma albo trzema cyklonami).

Zmiany maksymalnej wartości produkcji od zadanej zawartości popiołu w koncentracie końcowym pokazane są na rys. 11. Są to wartości względne – jako poziom odniesienia (100%) przyjęto maksymalną wartość produkcji w układzie referencyjnym z jednym cyklonem wodnym. Dość spory – od kilku do ponad dwudziestu procent – przyrost wartości produkcji przy wzbogacaniu wtórnym wynika ze znacznej poprawy dokładności wzbogacania. Wypadkowa krzywa rozdziału przesuwana jest w lewo, w kierunku mniejszych gęstości (jak na rys. 6). Dzięki temu zadana zawartość popiołu w koncentracie uzyskiwana jest przy większych gęstościach rozdziału niż w przypadku pojedynczego cyklonu wodnego; uzyskiwany jest więc większy wychód koncentratu i większa wartość produkcji. Przyrost wartości produkcji jest najbardziej widoczny w przypadku zastosowania drugiego cyklonu wodnego, trzeci cyklon powoduje mniejszy przyrost wartości produkcji. Analizy ekonomiczne wzbogacania węgla w układach osadzarek ze wzbogacaniem wtórnym, polegające na porównaniu przyrostów wartości produkcji i przyrostów kosztów eksploatacyjnych pozwalają stwierdzić, że ich zastosowanie jest ekonomicznie opłacalne (Boron i in. 2014); przez analogię podobny wniosek można przyjąć dla układów

wtórnego wzbogacania w cyklonach wodnych, tym bardziej, że przyrosty wartości produkcji są większe niż w przypadku układów z osadzarkami.

Możliwe jest też ponowne wzbogacanie odpadów pośrednich. Z przeprowadzonych analiz wynika jednak, że przy wymaganej, dobrej jakości koncentratu uzyskiwana wartość produkcji jest mniejsza nawet od wartości produkcji w układzie z pojedynczym wzbogacalnikiem (Pielot 2011).

Wnioski

Dzięki wtórnemu wzbogacaniu koncentratów przejściowych można uzyskać kształt krzywych rozdziału lepiej zbliżony do idealnej krzywej rozdziału, co znacząco poprawia dokładność wzbogacania. Efekt poprawy kształtu krzywych rozdziału jest największy w przypadku dodatkowego, drugiego wzbogacalnika. Trzeci wzbogacalnik oczywiście również poprawia kształt krzywej, niemniej uzyskiwany efekt nie jest już tak duży (rys. 5 i 6). Kształt najbardziej zbliżony do idealnej krzywej przyjmuje wypadkowa krzywa rozdziału przy równych gęstościach rozdziału odpowiednio w dwóch (albo w trzech) wzbogacalnikach. Wtedy też dokładność wzbogacania jest najlepsza (Pielot 2011, s. 114), a algorytm maksymalizacji produkcji dobiera równe gęstości rozdziału.

Przy wzbogacaniu wtórnym wypadkowe krzywe rozdziału przesuwają się w kierunku mniejszych gęstości, również wypadkowa gęstość rozdziału się zmniejsza. Jeśli w koncentracie końcowym zadana jest zawartość popiołu, wtedy aby ją uzyskać w układach z wtórnym wzbogacaniem, należy zwiększyć gęstość rozdziału w każdym wzbogacalniku, w stosunku do gęstości rozdziału w układzie z pojedynczym wzbogacalnikiem. Zwiększenie gęstości rozdziału powoduje wzrost wychodu koncentratu końcowego oraz wzrost wartości produkcji – szczególnie w przypadku małej zadanej zawartości popiołu. Ilość nadawy do drugiego i trzeciego wzbogacalnika jest wtedy istotnie mniejsza, a więc mogą to być maszyny o mniejszej wydajności.

W cyklonach z cieczą ciężką dokładność wzbogacania jest na tyle dobra, że ponowne wzbogacanie koncentratu przejściowego skutkuje minimalnie większą wartością produkcji. Stosowanie wzbogacania wtórnego w układach z cyklonami z cieczą ciężką jest nieopłacalne ekonomicznie. W przypadku cyklonów wodnych, w których dokładność jest gorsza, wzbogacanie wtórne pozwala uzyskać znacznie większą wartość produkcji, zwłaszcza o dobrej jakości.

Przy wzbogacaniu wtórnym możliwe jest uzyskanie mniejszej minimalnej zawartości popiołu w koncentracie niż w przypadku pojedynczego cyklonu wodnego (rys. 11).

Literatura – References

1. Blaschke J., i in. 2006 – Mała Encyklopedia Inżynierii Mineralnej. Inżynieria Mineralna nr 4 (17).
2. Boron i in., 2014 – Boron S., Pielot J., Wojaczek A., – Ocena opłacalności wzbogacania węgla w układach osadzarek. Coal cleaning in jig systems – profitability assessment. Mineral Resources Management – Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2014, tom 30, zeszyt 2, s. 67–82.
3. Cierpisz S., Pielot J., 2001 – Symulacyjne statyczne modele procesów i układów sterowania w zakładach wzbogacania węgla. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 28.
4. Goodman F., McCreery J., 1980 – Coal Preparation Computer Model. Vol.I. U.S. Environmental Protection Agency, Washington.
5. Holuszko M.E., 2016 – Coal Mining and Processing in Canada. Czasopismo Techniczne KTT nr 166–167, s. 9–17.
6. Kalinowski K., 1997 – Wykorzystanie charakterystyk flotowalności w zagadnieniach optymalizacji konfiguracji układów flotacji. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 13, z. spec., s. 165–174.
7. Kalinowski K., 2000 – The use of generalized characteristics of flotation systems in the problems of their optimization. Information Technologies and Systems, Lviv, pp. 77–84.
8. Kalinowski K., 2007 – Information Structures of Technological Flotation Systems. Network Integrators Associates, Parkland, Florida.
9. Lenartowicz i in., 2010 – Lenartowicz M., Kowol D., Łagódka M., – Metoda doboru pokładów sitowych dla osadzarek wodnych pulsacyjnych. Kwartalnik Górnictwo i Geoinżynieria, z. 4/1, Kraków, s. 135–143.
10. Lorenz i in., 2002 – Lorenz U., Blaschke W., Grudziński Z., – Propozycja nowej formuły sprzedażnej węgla energetycznego przeznaczonego dla energetyki zawodowej. Studia, Rozprawy, Monografie, nr 112, Wydawnictwo IGSMiE, Kraków.
11. Martyniak J., 1996 – Metody maksymalizacji wychodu koncentratu węglowego. Wiadomości Górnicze nr 5, s. 235–240.
12. Pielot J., 2007 – Wartość produkcji przy różnych konfiguracjach grupy osadzarek dwuproduktowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1765, seria Górnictwo, z. 280, Gliwice, s. 345–351.
13. Pielot J., 2009 – Poprawa efektywności produkcji w strukturach o różnej konfiguracji wzbogacalników dwuproduktowych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 1 (455), s. 32–40.
14. Pielot J., 2010a – Wielokryterialna analiza wartości produkcji w przykładowym układzie z wielokrotnym wzbogacaniem węgla. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 2 (468), s. 11–20.
15. Pielot J., 2010b – Wielokryterialna analiza wartości produkcji w układzie technologicznym wzbogacania węgla. Wiadomości Górnicze nr 9, Katowice, s. 529–534.
16. Pielot J., 2011a – Wielokryterialna optymalizacja produkcji układów technologicznych grup wzbogacalników grawitacyjnych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 306, Gliwice.
17. Pielot J., 2015a – Poprawa dokładności wzbogacania węgla kamiennego w układach ze wzbogacaniem wtórnym. XL Konferencja Automatyka, Telekomunikacja, Informatyka, ATI 2015, Szczyrk, 24–26 czerwca, str. 155–167.
18. Pielot J., 2015b – Porównanie efektów wtórnego wzbogacania węgla przy różnej dokładności

ci wzbogacania. Mineral Engineering Conference MEC 2015 (III Polski Kongres Górniczy), Szczawnica 14-17 września, Materiały konferencyjne s. 20–23.

19. Pielot J. 2015c – Wzbogacanie wtórne węgla kamiennego w osadzarkach z recyrkulacją produktu przejściowego. Mineral Engineering Conference MEC 2015 (III Polski Kongres Górniczy), Szczawnica 14-17 września, Materiały konferencyjne s. 24–27.
20. Pielot J., 2016 – Production value optimization with intermediate jig product recirculation. Mineral Engineering Conference MEC 2016, Świeradów-Zdrój, 25–28 września (E3S Web of Conferences; vol. 8 2267–1242).
21. Pielot J., 2017 – Wtórne wzbogacanie węgla kamiennego w osadzarkach i cyklonach wodnych. Inżynieria Mineralna nr 2 (40), s. 31–36.
22. Salama A.I.A., Mikhail M.W., 1994 – Maksymalizacja wychodu koncentratu w zakładach przeróbki węgla. XII ICPC, Kraków, 23–27 maja, t.4, s. 43–51.
23. Ściążko M., Dreszer K., 1996 – Uszlachetnione paliwa węglowe dla gospodarki komunalnej. Konferencja Poprawa jakości węgla..., Szczyrk 19–21 czerwca, s. 91–115.
24. Trybański K., 1996 – Optymalizacja w przeróbce kopalin. Archives of Mining Sciences t. 41 (3), s. 371–392.
25. Venkoba Rao B., Kapur P.C., 2008 – Simulation of multi-stage gravity separation circuits by size-density. International Journal of Mineral Processing 89, p. 23–29.
26. Yagun i in., 2002 – Yagun H., Shan L., Maixi L., 2002 – A Profit-Oriented Expert System for Coal Washery Optimization. Coal Preparation 22, p. 93–107.

Improving the Accuracy of Coal Enrichment in Cyclones with Secondary Enrichment

The issues of secondary hard coal enrichment in cyclones without grinding of intermediate concentrate were presented. Cyclone separation curves, used in modeling the enrichment process, were discussed. In particular, the effect of improving the shape of the split curves in two- and three-cyclone systems was illustrated, which directly translates into an improvement in the accuracy of the enrichment. In cyclones with a heavy liquid the accuracy of enrichment is nevertheless good enough that the re-enrichment of the intermediate concentrate practically doesn't make a difference. The value of production is only slightly higher; use of secondary enrichment in systems with heavy media cyclones is not economically profitable. This is not the case with water cyclones. In secondary enrichment systems, a higher value of production with a given quality can be obtained.

Keywords: partition curves, coal secondary enrichment in cyclones, production optimization