



OCENA SKUTECZNOŚCI WZBOGACANIA I ODSIARCZANIA MUŁÓW WĘGLOWYCH WE WZBOGACALNIKACH ZWOJOWYCH

Zofia BLASCHKE^{*)}

^{*)} Dr inż.; Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, Wydział Górnictwa, Zakład Przeróbki Kopaliny, Ochrony Środowiska i Utylizacji Odpadów; Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel.: (0-12) 617-20-52, faks: (0-12) 617-21-98,

RECENZENCI: prof. dr hab. inż. Kazimierz SZTABA; doc. dr hab. inż. Eugeniusz MOKRZYCKI

Streszczenie

W ostatnich latach w kilku zakładach wzbogacania węgla kamiennego pracują wzbogacalniki zwojowe (spirale). Służą one do wydzielenia pirytu oraz kamienia z drobnych klas ziarnowych. W artykule przedstawiono rezultaty badań wzbogacania nadawy pochodzącej z wylewu hydrocyklonów wodnych. Dokonano oceny rozdziału wąskich klas ziarnowych, na które podzielono nadawę, koncentrat, produkt przejściowy i odpady. Wydzielono klasy ziarnowe, w których oznaczono zawartość popiołu i siarki, rozdzielono następnie na frakcje gęstościowe i określono w nich zawartości popiołu. Ocenę procesu wzbogacania oparto na określeniu wskaźnika rozproszenia prawdopodobnego. Stwierdzono, że stosowanie spiral pozwala na skuteczne wzbogacanie i odsiarczanie drobnych klas ziarnowych węgla.

1. Wprowadzenie

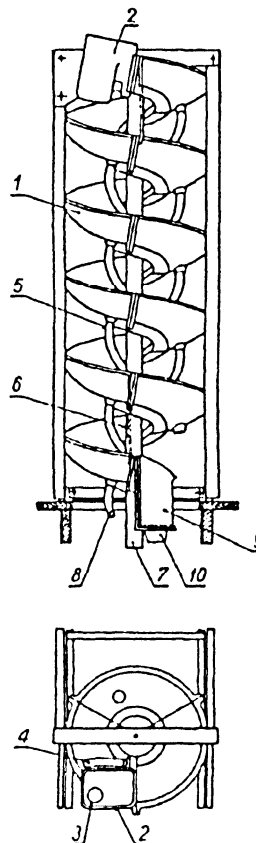
Twórcą wzbogacalników zwojowych (spirali), w których rozdział następuje w płynącym strumieniu wody, był Ira B. Humphrey Jr. Podstawowym elementem konstrukcyjnym spirali jest rynnna zwinięta śrubowo dookoła osi pionowej (helisa). Humphrey rozpoczął badania w 1941 roku na instalacji wykonanej ze starych opon samochodowych. Pierwsza instalacja przemysłowa (1943 r.) była wykonana z kształtowników żeliwnych i służyła do wydzielenia minerałów ciężkich z piasków morskich. Do wzbogacania węgla spirale zastosowano w 1945 r. W następnych latach do produkcji spirali wprowadzono nowe tworzywa, kolejno: cement azbestowy, włókna szklane, żywice uretanowe, monopolimery. Zastosowanie monopolimerów umożliwiło produkcję helis o dużej trwałości, dobrych właściwościach powierzchniowych i o złożonym profilu przekroju.

Na rys. 1 przedstawiono ogólny widok wzbogacalnika zwojowego.

Bardzo szybki rozwój konstrukcji spirali nastąpił w latach siedemdziesiątych i trwa nadal. Liczne prace badawcze prowadzi się w Australii, Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej, Kanadzie i Rosji. Celem badań jest doskonalenie konstrukcji i sposobu prowadzenia procesu dla uzyskania jeszcze lepszych warunków wzbogacania surowców oraz opisu teoretycznych podstaw procesu rozdziału.

Głównymi parametrami charakteryzującymi budowę spirali są skok oraz geometria i długość helisy. Wymienione parametry wzajemnie się uzupełniają i zmiany jednego z nich mają znaczący wpływ na

wyniki wzbogacania. Profil przepływu w separatorach zwojowych zmienia się wraz z natężeniem przepływu nadawy i wpływa na dokładność wzbogacania. Ważnym parametrem jest zawartość części stałych w nadawie (dla węgla nie większa niż 30%, 400 g/dm³). Wszystkie parametry muszą być dobre do rodzaju i zakresu uziarnienia nadawy [1, 2, 3].



Rys. 1. Wzbogacalnik zwojowy (Humphrey) [1]

1 – rynnna, 2 – skrzynia nadawcza, 3 – wlot nadawy, 4 – doprowadzenie wody dodatkowej, 5 – przewód odprowadzający produkt ciężki, 6 – centralny przewód odprowadzający produkt ciężki, 7 – odprowadzenie produktu ciężkiego, 8 – odprowadzenie produktu pośredniego, 9 – skrzynia odbiorcza produktu lekkiego, 10 – wylew produktu lekkiego

W polskim przemyśle wydobywczym spirale pracują w pięciu zakładach wzbogacania miałów węglowych i w jednym zakładzie przeróbki mułów ze stawów osadowych. Spirale będą stosowane również w budowanych obecnie i projektowanych zakładach wzbogacania miałów węglowych.

Wszystkie pracujące w Polsce spirale były dobrane i dostarczane przez firmy zagraniczne.

2. Zasada rozdziału w separatorach zwojowych

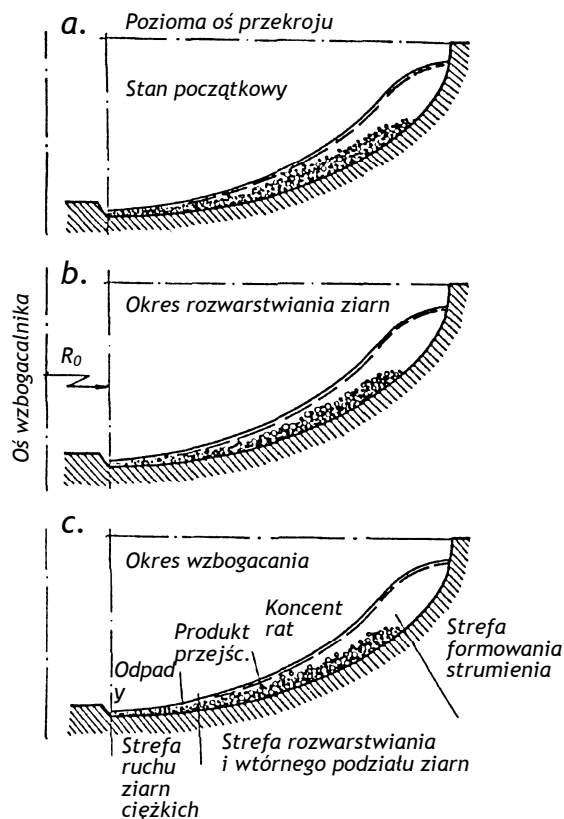
Nadawę do separatora zwojowego wprowadza się ze skrzyni nadawczej aby zlikwidować zaburzenia przepływu wywołane działaniem pomp. Ze skrzyni nadawczej nadawa spływa na powierzchnię wzbogacalnika w postaci bardzo dobrze wymieszanej zawiesiny (prawie jednorodnej).

Podczas przepływu po zwojach separatora następuje rozwarstwienie zawiesiny w płaszczyźnie pionowej i w płaszczyźnie poziomej. Kształt powierzchni przepływu w separatorze zwojowym powoduje ustalenie gradientu prędkości warstwy płynącej w płaszczyźnie pionowej i gradientu prędkości warstwy w płaszczyźnie poziomej. W płaszczyźnie pionowej rozwarstwienie następuje w wyniku opadania skrępowanego i filtracji wielowarstwowej. W płaszczyźnie poziomej rozwarstwienie następuje w wyniku działania siły odśrodkowej.

W wyniku opadania skrępowanego ziarna ciężkie przechodzą w pobliżu powierzchni koryta do strefy niskiej prędkości natomiast lekkie do znajdującej się powyżej strefy wyższej prędkości. Przepływ po linii śrubowej powoduje zróżnicowanie prędkości przepływu w separatorze zwojowym, w płaszczyźnie poziomej. Różnica w wartościach sił odśrodkowych działających na przepływające ziarna o różnej masie i na różnych promieniach powoduje powstanie rotacji krzyżowej. Część strumienia najbliższa powierzchni przepływu przechodzi na zewnątrz do punktu maksymalnej prędkości przepływu a stąd w dół do strumienia w pobliżu powierzchni spirali i zgodnie z nachyleniem powierzchni spirali przesuwa się do wewnętrznej skrajni strumienia. W wyniku takiego przepływu ziarna ciężkie są przenoszone do środka w kierunku osi spirali gdzie trafiają na otwory odbierające frakcje ciężkie a ziarna lekkie szybciej płynące ale wolniej osadzające się są transportowane w kierunku przeciwnym do linii otworów. Ciężkie i lekkie składniki mineralne strumienia są w ten sposób przenoszone bocznie w przeciwnych kierunkach w wyniku czego następuje separacja jednych od drugich (rys. 2).

W niektórych spiralach pomiędzy otworami odbierającymi frakcję ciężką podaje się od wewnątrz-

nego brzegu koryta dodatkowo wodę w celu intensyfikacji wypłukiwania lekkich ziaren z powierzchni łoża tworzącego się na wewnętrznym brzegu z powrotem w kierunku zewnętrznego brzegu koryta.



Rys. 2. Główne fazy rozdziału ziaren w rynnie wzbogacalnika zwojowego oraz strefy układu ziaren w końcowej fazie rozdziału [1]

3. Sposób prowadzenia i wyniki badań

Na wyniki rozdziału we wzbogacalnikach strumieniowych mają wpływ parametry konstrukcyjne i ruchowe (natężenie przepływu oraz charakterystyka nadawy). Zakładając, że parametry konstrukcyjne spirali oraz natężenie przepływu nadawy zostały przez projektantów dobrane prawidłowo, przeprowadzono [4] badania w celu dokonania oceny procesu rozdziału nadawy w wąskich klasach ziarnowych. Badania wykonano w układzie technologicznym w którym nadawę na spirale stanowi wylew z hydrocyklonów wzbogacających (HWO – Water Only).

Według projektu nadawę na hydrocyklony stanowi materiał o uziarnieniu poniżej 0,9 mm. Próbkę do badań pobrano podczas jednej zmiany roboczej, przy pełnym obciążeniu zakładu, ze strumienia nadawy, koncentratu, produktu przejściowego i odpadów. We wszystkich pobranych próbkach określono zagęszczenie a następnie rozszano je na wąskie

klasy ziarnowe. Wydzielone klasy ziarnowe rozdzielono na frakcje gęstościowe. Łącznie wykonano 4 analizy sitowe i 28 analiz densymetrycznych. W wyniku rozdzielów uzyskano 28 klas ziarnowych i 195 frakcji gęstościowych.

We wszystkich klasach ziarnowych określono zawartości popiołu i siarki całkowitej. We wszystkich frakcjach gęstościowych określono zawartości popiołu.

Wyniki analiz sitowych i zagęszczenia pobranych próbek zestawiono w tabeli 1, a wyniki zawartości popiołu i siarki zestawiono w tabelach 2 i 3.

Analiza przedstawionych wyników wykazała, że skład ziarnowy materiału kierowanego na spirale różni się zdecydowanie od składu ziarnowego przewidywanego w projekcie. Udział ziarn większych od 0,9 mm wynosi ponad 50%. Również zagęszczenie nadawy jest wyższe od zalecanego dla zapewnienia optymalnych warunków wzbogacania węgla na spiralach. Mimo tego uzyskano bardzo dobrej jakości koncentraty i odpady dla ziarn większych od 0,5 mm (tab. 2 i 3). W zakresie uziarnienia poniżej 0,5 mm wraz ze zmniejszaniem się wielkości ziaren gwałtownie pogarszają się wyniki rozdziału. Ziarna poniżej 0,04 mm praktycznie nie ulegają wzbogacaniu.

Tabela 1
Skład ziarnowy nadawy i produktów rozdziału na wzbogalnikach zwojowych

| Klasa ziarnowa mm | Wychód, % | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------------|--------|
| | Nadawa | Koncentrat | Produkt pośredni | Odpady |
| + 2,0 | 26,12 | 40,92 | 23,87 | 13,86 |
| 2,0 – 1,0 | 23,87 | 29,44 | 25,66 | 18,67 |
| 1,0 – 0,8 | 9,58 | 5,53 | 10,25 | 12,82 |
| 0,8 – 0,5 | 16,18 | 6,19 | 15,01 | 26,02 |
| 0,5 – 0,1 | 16,55 | 8,23 | 16,57 | 23,82 |
| 0,1 – 0,04 | 1,78 | 1,58 | 2,09 | 1,69 |
| – 0,04 | 5,92 | 8,11 | 6,55 | 3,12 |
| zagęszczenie g/dcm ³ | 559 | 327 | 454 | 826 |

Tabela 2
Zawartości popiołu w wąskich klasach ziarnowych, w nadawie i produktach rozdziału wzbogalników zwojowych

| Klasa ziarnowa mm | | Zawartość popiołu, % | | | |
|-------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| d | d _s | A _n ^a | A _k ^a | A _{pp} ^a | A _o ^a |
| + 2,0 | 2,5 | 21,31 | 7,67 | 69,12 | 75,07 |
| 2,0 – 1,0 | 1,5 | 22,35 | 6,42 | 51,11 | 76,96 |
| 1,0 – 0,8 | 0,9 | 28,42 | 6,89 | 43,35 | 76,11 |
| 0,8 – 0,5 | 0,65 | 41,27 | 6,08 | 41,28 | 76,35 |
| 0,5 – 0,1 | 0,30 | 45,46 | 11,30 | 33,93 | 77,12 |
| 0,1 – 0,04 | 0,07 | 39,62 | 26,77 | 31,39 | 68,07 |
| – 0,04 | 0,02 | 34,62 | 33,12 | 35,31 | 39,02 |
| Razem | | 29,36 | 9,95 | 48,84 | 75,13 |

Tabela 3
Zawartości siarki całkowitej w wąskich klasach ziarnowych, w nadawie i produktach rozdziału wzbogalników zwojowych

| Klasa ziarnowa, mm | | Zawartość siarki całkowitej, % | | | |
|--------------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| d | d _s | S _{tn} ^a | S _{tk} ^a | S _{pp} ^a | S _{to} ^a |
| + 2,0 | 2,5 | 0,64 | 0,64 | 0,67 | 0,76 |
| 2,0 – 1,0 | 1,5 | 0,67 | 0,60 | 0,99 | 1,17 |
| 1,0 – 0,8 | 0,9 | 1,05 | 0,63 | 0,90 | 1,67 |
| 0,8 – 0,5 | 0,65 | 1,23 | 0,55 | 0,90 | 1,73 |
| 0,5 – 0,1 | 0,30 | 1,86 | 0,56 | 0,85 | 2,75 |
| 0,1 – 0,04 | 0,07 | 3,03 | 0,93 | 1,36 | 7,40 |
| – 0,04 | 0,02 | 0,96 | 0,75 | 0,95 | 1,14 |
| Razem | | 0,94 | 0,64 | 0,87 | 1,80 |

Kolejnym etapem pracy było wyliczenie udziałów poszczególnych klas ziarnowych (wychodów) produktów wzbogacania w odniesieniu do nadawy. Wychody te wyliczono z bilansu produktów poszczególnych klaso-frakcji przy założeniu, że suma wychodów produktów musi być równa 100%. Poprawność wyliczeń sprawdzono wykonując bilans zawartości popiołu.

Poprawne wyniki obliczeń uzyskano dla ziaren większych od 0,1 mm. Dla klas ziarnowych 0,1 – 0,04 mm i –0,04 mm nie udało się wyliczyć wychodów produktów ze względu na trudności uzyskania poprawnych analiz gęstościowych. Z tego powodu dalszą analizę prowadzono dla ziaren o wymiarach większych od 0,1 mm.

4. Ocena procesu wzbogacania we wzbogalnikach strumieniowych

Ocenę procesu wzbogacania we wzbogalnikach strumieniowych oparto na określeniu wskaźnika rozproszenia prawdopodobnego E_p [g/cm³] dla poszczególnych klas ziarnowych. Na podstawie wyników doświadczeń wyliczono i wykreślono rzeczywiste krzywe rozdziału a następnie metodą podaną przez Budryka [5] wykreślono teoretyczne krzywe rozdziału.

Z krzywych teoretycznych odczytano gęstości rozdziału na granicy koncentrat – produkt pośredni i gęstości rozdziału na granicy produkt pośredni – odpady. Nie udało się odczytać gęstości rozdziału na granicy produkt pośredni – odpady dla klasy ziarnowej +2,0 mm ponieważ znajdowała się ona powyżej gęstości, przy której prowadzono rozdziel w warunkach laboratoryjnych (powyżej 2,0). Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 4.

Z danych zestawionych w tabeli 4 wynika jednoznacznie, że wraz ze zmniejszaniem się wielkości ziaren wzbogacanego materiału maleją gęstości roz-

działu. W zakresie uziarnienia +2,0 mm do 0,5 mm wraz ze zmniejszaniem się wielkości ziaren rośnie dokładność rozdziału. Dokładność rozdziału na granicy produkt pośredni – odpady jest wyższa niż na granicy koncentrat – produkt pośredni. Dla ziaren mniejszych od 0,5 mm dokładność rozdziału pogarsza się zdecydowanie.

Jest to uzasadnione teoretycznie. Przy założeniu stałych warunków przepływu rozdział na spiralach zależy od wielkości i gęstości ziaren, przy czym wielkość ziaren ma większy wpływ niż gęstość ziaren. W wąskich klasach ziarnowych o rozdziale decyduje różnica gęstości ziaren. Różnica gęstości ziaren koncentratu i produktu pośredniego jest mniejsza niż różnica gęstości ziaren produktu przejściowego i odpadów. W zakresie uziarnienia 0,5 – 0,14 mm bardziej wyraźnie niż w przypadku ziaren +0,5 mm występuje proces klasyfikacji wymiarowej, co zmniejsza dokładność rozdziału według gęstości. Ziarna skrajnie drobne są unoszone przez wodę i razem z nią trafiają do różnych produktów.

Tabela 4

Zestawienie gęstości rozdziału Δ i rozproszenia prawdopodobnego E_p

| Klasa ziarnowa mm | Rozdział na granicy koncentrat – produkt pośredni | | Rozdział na granicy produkt pośredni – odpady | |
|-------------------|---|-------------------------|---|-------------------------|
| | Δ g/cm ³ | E_p g/cm ³ | Δ g/cm ³ | E_p g/cm ³ |
| + 2,0 | 1,95 | 0,20 | poza zakresie badań | |
| 2,0 – 1,0 | 1,88 | 0,18 | 1,96 | 0,16 |
| 1,0 – 0,8 | 1,64 | 0,16 | 1,92 | 0,12 |
| 0,8 – 0,5 | 1,56 | 0,16 | 1,90 | 0,12 |
| 0,5 – 0,1 | 1,46 | 0,20 | 1,88 | 0,18 |

5. Podsumowanie

Zastosowanie spiral w procesie wzbogacania mułów węglowych pozwala na skuteczne ich wzbogacanie i odsiarczanie. Z nadawy o zawartości popiołu 29,36% A^a i siarki całkowitej 0,94% S_t^a uzyskano koncentrat o zawartości popiołu 9,95% A^a i siarki 0,64% S_t^a oraz odpady o zawartości 75% A^a i 1,80% S_t^a . Zawartość siarki zmniejszyła się również w produkcie pośrednim, co świadczy o bardzo dużej skuteczności odsiarczania węgla na spiralach.

Zakres uziarnienia nadawy kierowanej do wzbogacania na badane spirale znacznie odbiegał od przewidywanego w projekcie (tab. 1).

Dokładność rozdziału zmieniała się wraz z uziarnieniem nadawy. W badanym przypadku najdokładniej proces przebiegał dla uziarnienia 1,0 – 0,5 mm (tab. 4).

Materiał o uziarnieniu +2,0 mm i 0,5 – 0,1 mm ulegał wzbogacaniu z małą dokładnością. W zakresie ziaren skrajnie drobnych proces wzbogacania zanikał. W materiale o uziarnieniu –0,04 mm zawartości popiołu w poszczególnych produktach różniły się niewiele.

Rozdział na granicy produkt pośredni – odpady był we wszystkich przypadkach dokładniejszy niż na granicy koncentrat – produkt pośredni.

W prowadzonych badaniach wraz ze zmniejszaniem się wielkości ziaren obniżała się gęstość rozdziału na granicy koncentrat – produkt pośredni i produkt pośredni – odpady (tab. 4).

Na nowoczesnych spiralach można uzyskać dużą dokładność rozdziału wówczas gdy są dotrzymane warunki prowadzenia procesu tj. stałe natężenie przepływu i uśredniona nadawa (zagęszczenie, skład ziarnowy, skład densymetryczny).

6. Literatura

1. Blaschke W., Blaschke S.: *Technika wzbogacania grawitacyjnego. Wzbogacalniki strumieniowe*. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Kraków 1999.
2. Gärtner H.G.: *Sortierspiralen für die Fein- und Feinstkornaufbereitung*. Glückauf 130 Nr 5. Wydawnictwo Glückauf GmbH. Essen.
3. Iwanow W.O., Prokopiew S.A.: *Wintowyje apparaty dla obogaszczeniya rud i pieskow w Rossii*. Wydawnictwo „OAKSI”, 2000 r., Moskwa.
4. *Sprawozdanie z realizacji tematu badań statutowych „Badania podstawowe w zakresie przeróbki i utylizacji surowców naturalnych i wtórnych” za lata 1998 i 1999*. Biblioteka Zakładu Przeróbki Kopalni, Ochrony Środowiska i Utylizacji Odpadów.
5. Stepiński W.: *Wzbogacanie grawitacyjne*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1964 r. Warszawa.

Praca wykonana w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.100.238

Evaluation of the effectiveness of the beneficiation and desulfurisation of coal slime in spirals

The installation using spirals for coal beneficiation have been operated in Polish processing plants since many years. Their main aim is to remove pyrite and rock grains from fine class coal of steam coal. The results of slime beneficiation investigation made in one of chosen processing plant are presented in the paper. When the processing plant was working the samples of raw coal and separation spiral's products were taken. These samples were then separated on narrow grain classes at the laboratory screen. Next, each grain classes separated in heavy density liquid on fractions. Ash and sulphur content were denoted, for each, created in this way, sample. The obtained results allowed to make an investigation of the evaluation of accuracy for coal slime beneficiation and desulphurisation on spirals.