



Zmiany w obrazie wzbogacania osadowego wynikające z analizy probabilistycznego modelu rozkładu gęstości warstw łoża osadzarki

Stanisław GŁOWIAK¹⁾

¹⁾ Zakład Automatyki „BGG” S.c.; email: sgłowiak@gmail.com

<http://doi.org/10.29227/IM-2022-01-02>

Submission date: 16-01-2022 | Review date: 22-03-2022

Abstrakt

Wyniki modelowania i doświadczalnego sprawdzenia probabilistycznego modelu rozkładu gęstości warstw w łożu osadzarki pozwalają zauważyć istotne różnice w obrazie procesu wzbogacania w osadzarce wynikające z tego modelu i dotychczasowym rozumieniu tego procesu. Zauważone różnice mają duże znaczenie zarówno dla jego teoretycznego opisu jak i dla praktyki wzbogacania węgla. Pozwalają także na wskazanie właściwego kierunku wprowadzenia zmian w konstrukcji osadzarki. Niniejsza praca jest opisem szczegółów zauważonych różnic i ich znaczenia dla poprawnego rozumienia procesu osadzania. Wśród tych szczegółów duże znaczenie mają niezauważone do tej pory zmiany rozkładów gęstości warstw łoża i rozkładów mas w poszczególnych warstwach związane z rozpraszaniem się cząstek wzbogacanego materiału.

Słowa kluczowe: wzbogacanie surowców mineralnych, osadzanie, wodna osadzarka pulsacyjna

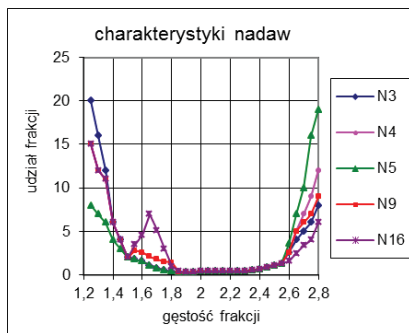
1. Wprowadzenie

Niniejszy artykuł jest ostatnią z pięciu prac tworzących pewną całość zogniskowaną na zagadnieniu rozkładu gęstości i mas warstw w łożu osadzarki. Pierwsza z nich (Głowiak 2019) przedstawia krytyczny przegląd prac związanych z teorią krzywych rozdziału i związku tej teorii z rozpraszaniem się cząstek wzbogacanego w warstwach łoża osadzarki opisywanych pojęciami używanymi w rachunku prawdopodobieństwa. Wynika z niej konieczność znacznej korekty teoretycznego opisu tych zagadnień w istniejącej literaturze. Aby ta korekta została poprawnie wykonana konieczne jest skonstruowanie modelu matematycznego właściwie opisującego rozpraszanie się cząstek wzbogacanego w warstwach łoża osadzarki. Opis założeń do takiego modelu przedstawia druga z tych prac (Głowiak 2020). Szczegółowo przedstawiono w niej wszystkie pojawiające się ograniczenia istotne dla poprawności działania tworzonego modelu. Dokładny opis tego modelu jest zawarty w trzeciej pracy (Głowiak 2020) podającej interpretację zastosowanych w nim pojęć z rachunku prawdopodobieństwa na gruncie teorii wzbogacania grawitacyjnego. Znaczna rozbieżność wyników z modelu z opisem powszechnie przyjmowanym w literaturze jako poprawny była istotnym powodem powstania czwartej pracy (Głowiak 2022) przedstawiającej wyniki eksperymentalnego sprawdzenia poprawności modelu. Dobra zgodność modelu z wynikami eksperymentu spowodowała konieczność szerszego wyjaśnienia różnic z wynikami istniejących prac i stała się źródłem innego spojrzenia na proces wzbogacania w wodnej osadzarce pulsacyjnej przedstawionego w niniejszej pracy.

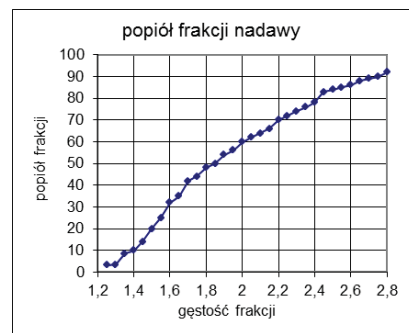
2. Porównanie założeń i realizacji modelu

Jedynym ogólnym założeniem przedstawionego probabilistycznego modelu rozkładu warstw w łożu osadzarki mającym podstawy fizyczne jest przyjęcie, że cząstka o gęstości ρ_c znajdująca się w warstwie o średniej gęstości ρ_w znajduje się

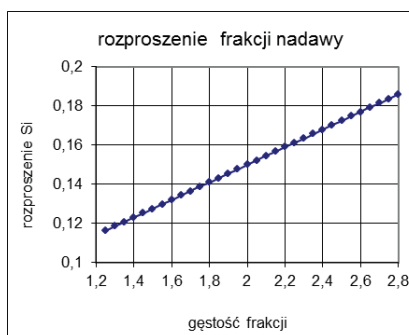
w stanie równowagi tylko wtedy, gdy średnia gęstość warstwy równa jest gęstości cząstki. W każdym innym przypadku istnieje siła wypadkowa działająca na tę cząstkę powodująca jej ruch w kierunku innych warstw. Fizycznym uzasadnieniem tego stwierdzenia są rozważania Zapały (Zapała 1988) oparte na istnieniu hipotetycznej cieczy ciężkiej o gęstości równej średniej gęstości cząstek w warstwie łoża osadzarki. Probabilistyczny charakter modelu wynika z zauważenia, że proces rozdziału cząstek w łożu osadzarki nie może przebiegać idealnie co powoduje, że cząstka nie zawsze trafia do warstwy równowagi. Pewność trafienia jest obrazem wzbogacania idealnego nieosiągalnego w rzeczywistym procesie wzbogacania. Wszystkie inne założenie szczegółowo przedstawione w pracy (Głowiak 2020) dotyczą tylko ograniczeń zapewniających zachowanie bilansu mas rozpraszanych cząstek oraz usunięciu z tworzonego modelu fizycznie nieuzasadnionych ograniczeń gęstości warstw istniejących w modelach Zapały i Kinga (King 1987). Takim ograniczeniem jest przyjęcie w założeniach tych modeli stałych średnich gęstości warstw. Istotne jest też zauważenie, że w obu wspomnianych modelach ograniczenia gęstości warstw zostały prawdopodobnie nieświadomie wprowadzone przez autorów w wyniku nie dość dokładnie sprecyzowanych założeń do tych modeli. Trzeba także dodać, że działanie tych modeli było zgodne z nie do końca prawdziwym obrazem wzbogacania rzeczywistego wprowadzonym przez prace Trompa i Terra'y (Tromp 1937, Terra 1938). Warto także zauważyć, że zmienną losową w modelu Zapały jest gęstość cząstki trafiającej do warstwy o stałej gęstości, podczas gdy w omawianym w tej pracy modelu zmienną losową jest gęstość warstwy, do której trafiają cząstki o z góry ustalonej gęstości. Stąd wynika wzmożona troska o poprawne pokazanie wszystkich, nawet pozornie nieistotnych, szczegółów działania modelu mogących wynikać z przyjęcia zbyt ogólnych i w rezultacie niewłaściwych założeń. Poprawne wyniki działania modelu w stanach krańcowych to jest wzbog-



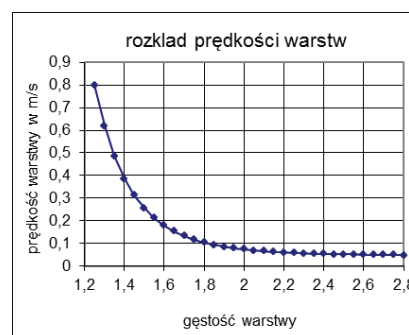
Rys. 1. Charakterystyki gęstościowe wybranych nadaw
Fig. 1. Density characteristics of selected feeds



Rys. 2. Zależność zawartości popiołu od gęstości frakcji przyjęta dla wszystkich nadaw
Fig. 2. Dependence of ash content on fraction density adopted for all feeds



Rys. 3. Zmiana rozproszenia przyjęta do modelowania
Fig. 3. Modification of dispersion adopted for modeling



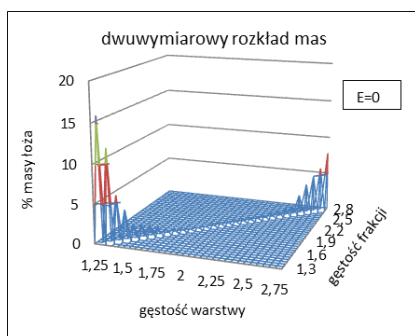
Rys. 4. Profil poziomych prędkości warstw łóża osadzarki
Fig. 4. Profile of the horizontal velocity of layers of the jig beds

gacania idealnego i całkowitego braku wzbogacania nie dają absolutnej pewności, że model działa dobrze w każdej sytuacji możliwej dla wzbogacania rzeczywistego. Pewnym testem dla poprawnego działania modelu w takich warunkach może być występowanie w obliczeniach maksymalnych wartości koncentracji cząstek frakcji gęstościowych nadawy w poszczególnych warstwach łóża osadzarki. Ta koncentracja jest szczególnie widoczna w macierzy C modelu podającej zawartość danej frakcji nadawy w poszczególnych warstwach. W wyniku sprawdzenia jaka frakcja gęstościowa nadawy posiada maksymalną koncentrację w danej warstwie w losowo wybranych z kilkudziesięciu obliczonych rozkładów okazało się, że jest to zawsze frakcja o gęstości najbardziej zbliżonej do średniej gęstości warstwy, lecz z dwoma wyjątkami wynikającymi z ograniczeń możliwości rozproszenia się frakcji w warstwie najcięższej i najlżejszej. Przy istnieniu odpowiednio dużego rozproszenia frakcje o gęstościach różnych od minimalnej i maksymalnej gęstości nadawy muszą zawsze trafić tylko w części do warstw najlżejszej i najcięższej, ponieważ istniejące w algorytmie obliczeń ograniczenia nie pozwalają im rozproszyć się w nieistniejących warstwach. Ponadto sprawdzany jest w każdym cyklu obliczeń bilans mas wszystkich warstw, który zawsze wynosi 100 % masy frakcji nadawy oraz średnia gęstość utworzonych warstw, która powinna być równa średniej ważonej wszystkich gęstości frakcji nadawy. Dodatkowym kryterium sprawdzenia poprawności modelu może być energia potencjalna cząstek łóża możliwa do obliczenia z rozkładu gęstości cząstek i mas poszczególnych warstw. Zmiana energii potencjalnej łóża wynikająca z hipotezy Mayera ma miejsce w wyniku startu obliczeń iteracyjnych z punktu gęstości średnich warstw równych

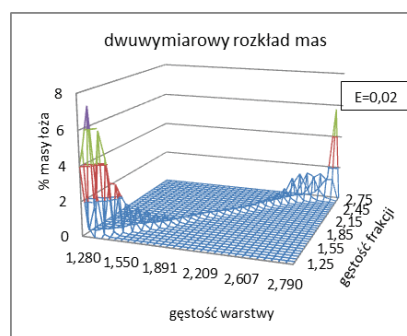
gęstości poszczególnych frakcji gęstościowych, co odpowiada wzbogacaniu idealnemu, a więc także najmniejszej energii potencjalnej cząstek łóża. Tak prowadzone obliczenia potwierdzają tezę modelu zakładającą, że wartością średnią rozkładu określającego rozpraszanie cząstek danej frakcji w powstałych warstwach jest średnia gęstość cząstek tej frakcji. W modelu Zapały ma miejsce całkowita zgodność średniej gęstości warstwy z rzeczywistą gęstością warstwy, lecz to nie wynika z działania modelu, lecz jest skutkiem przyjętych założeń, które powodują, że w łóżu mogą istnieć tylko warstwy o z góry wybranej gęstości zgodnej z gęstością rozpraszanych cząstek. Dalszą konsekwencją tak przyjętego założenia modelu Zapały jest brak konieczności obliczeń iteracyjnych. Powyższe uzasadnienie istotnych cech modelu pojawia się w tym miejscu, ponieważ ta sprawa nie została pokazana wystarczająco dokładnie w opisie założeń modelu jak i w przedstawieniu samego modelu i w dalszym etapie prowadzonych rozważań nie powinna budzić żadnych wątpliwości.

Działanie osadzarki wynikające z przedstawionego modelu pozostaje także w wyraźnej sprzeczności z opracowanym w pierwszej połowie XX wieku i obecnie jeszcze używanym kryterium oceny wzbogalności węgla opisanym tylko dla wzbogacania idealnego. Kwestia ta zostanie także szerzej przedstawiona w niniejszej pracy.

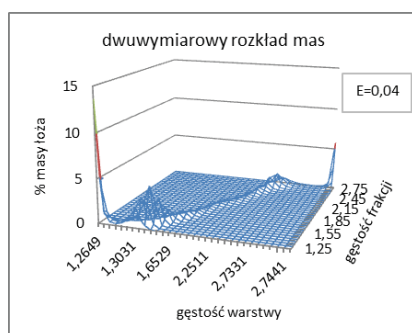
Istotna uwaga: wzbogacanie idealne (tylko $E=0$) w tym i wcześniejszych opracowaniach autora nie oznacza rozumienia tego pojęcia jak w pracy Drzymały (Drzymała 2009), gdzie jako idealne przyjmuje się takie prowadzenie wzbogacania węgla, aby uzyskać tylko frakcję gęstościową o najmniejszej zawartości popiołu, którą to frakcję uważa się jako czysty



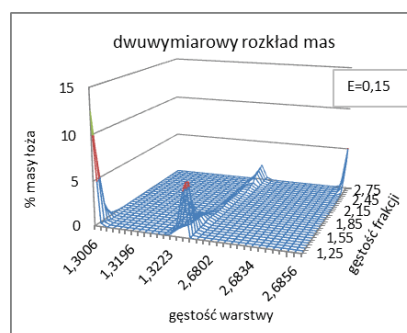
Rys. 5. Dwuwymiarowe rozkłady mas łoża dla wzbogacania idealnego
Fig. 5. Two-dimensional mass distributions of the bed for ideal enrichment



Rys. 6. Dwuwymiarowe rozkłady mas łoża dla bardzo dobrego wzbogacania
Fig. 6. Two-dimensional bed mass distributions for very good enrichment



Rys.7. Dwuwymiarowy rozkład mas łoża dla granicznej sprawności wzbogacania ofilopozomych prędkości warstw łoża osadzarki
Fig. 7. Two-dimensional mass distribution for the boundary upgrading efficiency



Rys. 8. Dwuwymiarowy rozkład mas łoża dla przeciętnej sprawności wzbogacania
Fig. 8. Two-dimensional mass distribution for average upgrading efficiency

pozyskiwany minerał. Takie rozumienie idealnego wzbogacania wynika ze znacznie szerszego rozpatrywania procesu wzbogacania mieszaniny różnych minerałów niż w przypadku wzbogacania węgla kamiennego.

3. Rozkłady gęstości warstw i mas warstw w łożu osadzarki dla różnych sprawności stratyfikacji warstw i różnych składów densymetrycznych nadawy

Przedstawiony model rozkładu gęstości warstw i mas zgromadzonych w tych warstwach jest silnie nieliniowy, co powoduje, że jego analiza wymaga sprawdzenia wyników we wszystkich interesujących przypadkach. Łącznie wykonano obliczenia dla ponad 100 różnych rozkładów obejmujących 18 różnych składów densymetrycznych nadawy, obrazujących szeroki zakres jej zmian spotykany w praktyce wzbogacania. Z tego materiału do pokazania wynikających z modelu wniosków wybrano tylko te przypadki, które najlepiej ilustrują różnice między obrazem procesu osadzania wynikającym z modelu i obecnym rozumieniem przebiegu tego procesu. Wszystkie przedstawione dalej wyniki obliczeń dotyczą nadaw, których charakterystyki są przedstawione na Rys.1.

W trakcie prowadzonych obliczeń kontrolowane były wychody produktów oraz ich jakość mierzona zawartością popiołu. We wszystkich obliczeniach przyjęto stałą zależność zawartości popiołu od gęstości. Tę zależność przedstawia Rys 2.

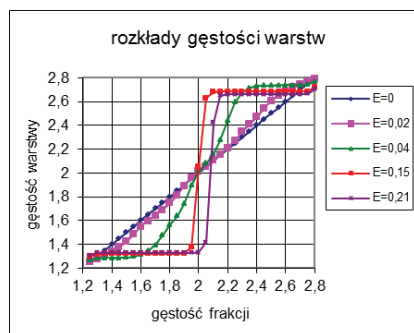
Gdyby bardzo wnikliwy czytelnik tej pracy zechciał sprawdzić poprawność obliczeń autora to dla dokonania tego będą mu potrzebne dwie charakterystyki podane na Rys. 3. i 4. Te charakterystyki są także stałe dla wszystkich obliczeń podanych w niniejszej pracy.

Jest oczywiste, że rozkłady gęstości warstw w łożu osadzarki muszą zależeć od składu gęstościowego wzbogacanego materiału i sprawności jego stratyfikacji. Aktualnie obowiązujące spojrzenie na wagę obu tych zależności jednoznacznie wskazuje na większe znaczenie składu nadawy przypisując jednocześnie jakości stratyfikacji niewielki wpływ na wynik rozwarstwienia. Tymczasem w przypadku wzbogacania węgla w osadzarkach mamy zwykle do czynienia z całkowicie inną wagą obu zależności, szczególnie jeżeli w tych rozważaniach uwzględnić także wpływ składu ziarnowego nadawy znacznie zmieniającego jakość procesu rozwarstwiania.

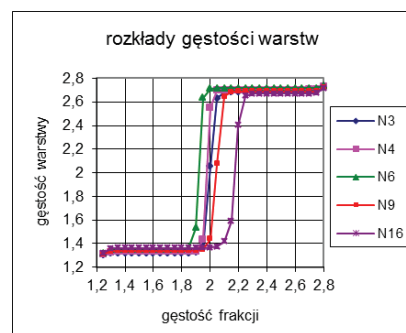
Istotny wpływ zmian rozproszenia najwyraźniej widoczny jest w dwuwymiarowych rozkładach mas poszczególnych frakcji gęstościowych nadawy, będących graficznym przedstawieniem wartości elementów a_{ij} podstawowej macierzy A modelu. Trzeba zauważyć, że empiryczny pomiar tych elementów w przemysłowej osadzarce nie jest możliwy. Na Rys. 5. i 6. przedstawione są te rozkłady dla tej samej nadawy oznaczonej N3 (Rys. 1.) i dla wzbogacania idealnego ($E=0$) oraz dla dobrze pracującego wzbogacalnika z cieżką ciężką lub osadzarki laboratoryjnej ($E=0,02$).

Wyraźnie widoczna jest niewielka zmiana rozkładu przy wzroście rozproszenia z $E=0$ do $E=0,02$. Takie zmiany w aktualnie istniejącym obrazie osadzania przyjmowane są jako prawdziwe także dla większych zmian rozproszenia. Tymczasem zmiany te dla większych rozprośnień wyglądają całkowicie inaczej i są przedstawione na Rys.7. i 8.

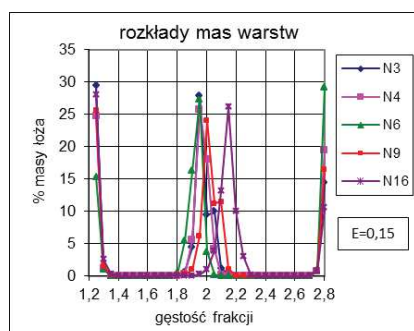
Graniczna wartość rozproszenia $E=0,04$ została przyjęta na podstawie pracy (Kowol 2010) jako najlepsza z możliwych do osiągnięcia dla nieidealnego procesu osadzania,



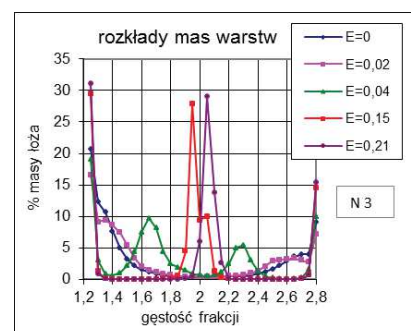
Rys. 9. Rozkłady gęstości warstw dla nadawy N3 i różnych rozprosen
Fig. 9. Distributions of layer density for feed N3 and different dispersions



Rys. 10. Rozkłady gęstości warstw dla rozprosenia E=0,15 i różnych nadaw
Fig. 10. Distributions of layer density for dispersion E=0,15 and different feeds



Rys. 11. Rozkłady mas w warstwach łoża dla różnych nadaw i tego samego rozprosen
Fig. 11. Mass distributions in the bed layers for different feeds and the same dispersion



Rys. 12. Rozkłady mas w warstwach łoża dla tej samej nadawy i różnych rozprosen
Fig. 12. Mass distributions in the bed layers for the same feed and different dispersions

natomiast $E=0,15$ jest wartością rozprosenia przyjmowaną w praktyce przemysłowej jako wynik wystarczająco dobry. Na Rys. 7. i 8. wyraźnie widoczna jest radykalna zmiana rozkładu mas w łożu osadzarki dla zakresu rozprosen $E>0,04$, przynosząca bardzo poważne skutki dla wyniku wzbogacania. W tym zakresie diagonalny charakter rozkładu mas zmienia się na rozkład, w którym istnieją dwie warstwy o skrajnych gęstościach i wysokiej koncentracji mas oraz pojawia się kilka warstw o bardzo zróżnicowanych gęstościach gromadzących większość całej masy łoża wszystkich warstw poza warstwami skrajnymi. Jednocześnie powstaje znaczna ilość bardzo cienkich warstw o bardzo małym zróżnicowaniu gęstościowym i gromadzących znikome ilości masy łoża. Szczegóły tej sytuacji zostaną poniżej pokazane na podstawie obliczonych z modelu zmian rozkładów gęstości warstw i mas poszczególnych warstw oraz ich położenia w pionowym przekroju łoża osadzarki dla różnych składów densymetrycznych nadawy i różnych rozprosen w procesie wzbogacania.

Dla wyjaśnienia szczegółów zmian zachodzących w łożu osadzarki przy zmianach jakości stratyfikacji i zmianach składu densymetrycznego nadawy wprowadza się dwie funkcje wiążące podane w opisie modelu wektory i dające wgląd w zmiany rozkładu warstw łoża.

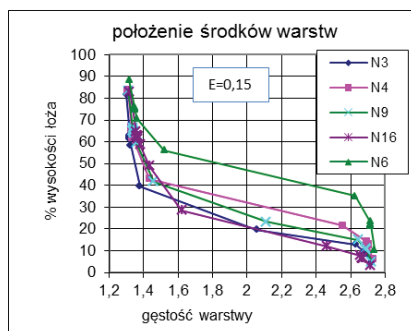
W prowadzonych w modelu obliczeniach dla każdego kroku obliczeń iteracyjnych znany jest skład densymetryczny nadawy dany wektorami R_c i U , parametry określające jakość stratyfikacji E i m oraz gęstość każdej powstałej warstwy i część masy wzbogacanego materiału zgromadzoną w tej warstwie określoną wektorem B_w . Zestawiając gęstości poszczególnych frakcji gęstościowych nadawy R_c i gęstości utworzonych warstw

R_w możemy określić dyskretną funkcję $R_w=f(R_c^T)$ pokazującą jaka gęstość ρ_{w_j} powstałej warstwy odpowiada gęstości frakcji ρ_{c_i} nadawy. Zależność ta zostaje nazwana rozkładem gęstości warstw. Zestawienie mas cząstek zgromadzonych w poszczególnych warstwach dane wektorem B_w i gęstości frakcji nadawy (wektor R_c) pozwala utworzyć inną dyskretną funkcję $B_w=f(R_c^T)$ łączącą te wielkości nazwaną rozkładem masy warstw. Zwraca się uwagę na istotny fakt, że obie funkcje są funkcjami przedstawionymi w liniowej skali na osi odciętych, która jest skalą przyjętą dla pokazania charakterystyk nadawy. Oba te rozkłady mogą być przedstawiony także inaczej jako funkcja średniej gęstości warstw. Wtedy skala na osi odciętych jest skalą nieliniową mniej korzystną dla pokazania zachodzących zmian.

Rysunki 11 i 12 przedstawiają zmiany zachodzące w rozkładach mas warstw łoża dla różnych składów gęstościowych nadawy i różnych rozprosen w procesie wzbogacania odpowiadających zmianom rozkładów gęstości warstw pokazanych na rys. 9 i 10.

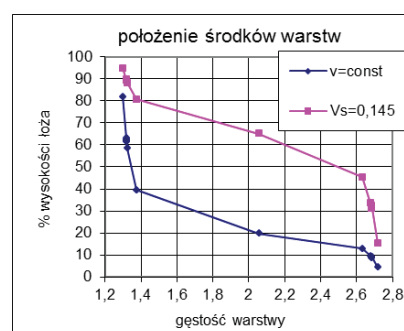
Na podstawie tych rysunków można zauważyć, że zmiany rozprosenia nie powodują proporcjonalnych do nich zmian w obu tych rozkładach.

Podane wyżej zależności mają duże znaczenie dla teoretycznych rozważań, natomiast dla praktyki wzbogacania węgla większe znaczenie mają położenia poszczególnych warstw. Rozważany model pozwala wyliczyć położenie tych warstw w pionowym przekroju łoża. Takie wyliczenia zostały użyte do eksperymentalnego sprawdzenia poprawności działania modelu, (Głowiak 2022). Rys. 13. i 14. pokazują zamiany zachodzące w położeniu geometrycznych środków warstw dla różnych składów gęstościowych nadawy, zmiany rozprosenia



Rys. 13. Położenie środków warstw dla różnych nadaw i stałego rozproszenia

Fig. 13. Layer center location for different feeds and constant dispersion



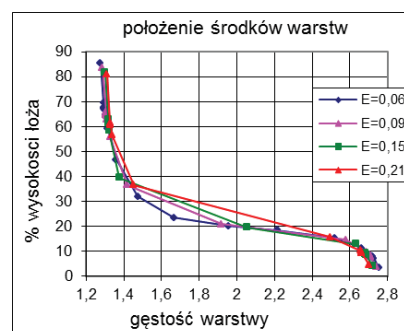
Rys. 14. Położenia środków warstw dla stałych i zmiennych prędkości warstw

Fig. 14. Layer center locations for constant and variable velocity of layers



Rys. 15. Położenie środków warstw dla nadawy N3 i niskich rozproszeń

Fig. 15. Layer center location for feed N3 and low dispersions



Rys. 16. Położenia środków warstw dla nadawy N3 i wysokich rozproszeń

Fig. 16. Layer center locations for feed N3 and high dispersions

i wpływu prędkości poziomej warstw na ukształtowanie profilu gęstości łóża.

Jak widać z powyższych wykresów zmiany położenia warstw są względnie niewielkie przy znacznych zmianach rozproszenia i duże dla zmian składu nadawy i zmian prędkości poziomej poszczególnych warstw. Na Rys. 14. widoczna jest znaczna zmiana położenia warstw generowana przez zmiany poziomych prędkości poszczególnych warstw związanych z ich profilem prędkości. Na tym rysunku pokazano sytuację, gdy wszystkie warstwy mają jednakowe prędkości i gdy ich prędkość jest zróżnicowana i zgodna z profilem z Rys. 2. Ważnym wnioskiem z porównania zmian położenia poszczególnych warstw jest konieczność stabilizowania poziomu warstwy o ustalonej gęstości dla poprawnego działania układu regulacji odprowadzania produktu ciężkiego. Ten wniosek wymaga dokładnego empirycznego sprawdzenia, ponieważ rozkład poziomych prędkości warstw jest zjawiskiem niewystarczająco zbadanym. Z drugiej strony widoczne jest pojawienie się ograniczenia dla możliwości regulacji jakości wybranego produktu wzbogacania związane z ograniczeniem możliwości precyzyjnego podziału warstw gromadzących znaczne ilości materiału, których skład gęstościowy jest silnie zależny od rozproszenia cząstek w warstwach w procesie stratyfikacji.

Zmiany rozproszenia powodują także duże zmiany koncentracji poszczególnych frakcji nadawy w wybranych warstwach. Jak duże są te zmiany pokazują Rys. 17. i 18. pozwalające także wyjaśnić przyczyny różnic w położeniach środków wysokości warstw jakie widoczne są na Rys. 15. i 16.

Powyższe wykresy pozwalają zauważyć, że warstwy o bardzo małej masie cząstek mają prawie identyczny skład gęstościowy cząstek nadawy w tych warstwach, a tylko

warstwy gromadzące większe masy cząstek mają wyraźnie zróżnicowany skład gęstościowy.

4. Zmiany w spojrzeniu na proces wzbogacania w osadzarce istotne dla teorii wzbogacania grawitacyjnego

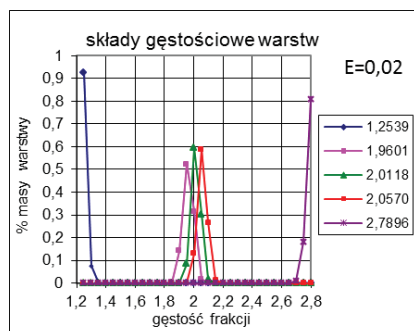
Rozproszenie prawdopodobne E_p zostało wybrane w tej pracy jako podstawowy wskaźnik oceny sprawności osadzania głównie ze względu na powszechność jego stosowania. Sprawność procesu osadzania oceniana wskaźnikami stosowanymi w przeróbce kopalin zależy według omawianego modelu tylko od procesu stratyfikacji wzbogacanego materiału jeżeli urządzenie rozdzielające rozwarstwiony materiał na dwa produkty działa prawidłowo.

Zmiana gęstości rozdziału wynikająca z nieidealnego działania urządzenia rozdzielającego zmienia wprawdzie ocenę jakości całego procesu, ale w proporcji jak Si zależy od współczynnika m rozważanego rozkładu gęstości warstw (Głowiak 2020), a więc względnie mało. Naturalna zmiana rozproszenia od gęstości cząstki nadawy, wyraźnie widoczna w zmniejszaniu się nachylenia krzywej rozdziału, nie jest wynikiem istnienia fluktuacji gęstości rozdziału powodowanymi przez to urządzenie.

Istnienie w modelu sprzężenia zwrotnego zmieniającego średnią gęstość tworzących się warstw uzasadnia konieczność obliczeń iteracyjnych, ponieważ zmiana gęstości warstwy zmienia prawdopodobieństwo trafienia do niej cząstek o danej gęstości.

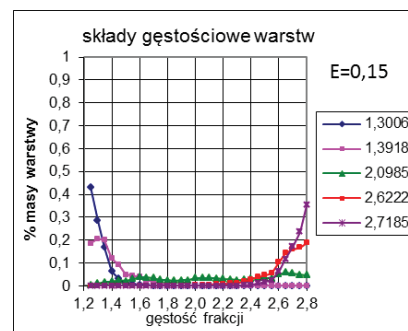
Istotne zmiany wynikające z nowego modelu zawarte są w poniższych uwagach.

Ilość rozróżnialnych gęstościowo warstw dla osadzarek przemysłowych jest niewielka i wynosi 3–6 warstw przy modelowaniu od 16 do 48 frakcji gęstościowych nadawy.



Rys. 17. Udziały frakcji gęstościowych nadawy N3 w różnych warstwach powstałych przy rozproszeniu $E=0,02$

Fig. 17. Shares of density fractions of the N3 feed in different layers formed at the dispersion $E=0.02$



Rys. 18. Udziały frakcji gęstościowych nadawy N3 w różnych warstwach powstałych przy rozproszeniu $E=0,15$

Fig. 18. Shares of density fractions of the N3 feed in different layers formed at the dispersion $E=0.15$

Istnieją dwa zasadniczo różne jakościowo procesy wzbogacania opisywane przez wskaźnik E modelu. Dla zakresu $0 < E < 0,04$, osiągalnym tylko w laboratoryjnych osadzarkach wsadowych głównie dzięki odpowiednio długim trwaniu wzbogacania obraz wzbogacania jest zbliżony do aktualnie istniejących poglądów przyjmujących, że rozproszenie ma względnie niewielki wpływ na rozkład warstw, który jest głównie zależny od składu gęstościowego nadawy. W zakresie $E > 0,04$ przebieg wzbogacania zmienia się radykalnie z powodu zmiany rozkładu gęstości warstw i przestaje być zgodny ze znanymi opisami teoretycznymi. Zmiany te nie są dobrze widoczne na wykresach wysokości położenia warstw o danej gęstości (Rys. 15. i 16.), lecz widać je bardzo wyraźnie w składach densymetrycznych poszczególnych warstw (Rys. 17. i 18.). Podkreśla się, że wszystkie przemysłowe osadzarki wzbogacające węgiel pracują właśnie w tym zakresie sprawności.

Granica między tymi dwoma typami procesu wzbogacania dostrzegalną w modelu jest diagonalny charakter macierzy A . Generalnie dla $E < 0,04$ macierze te mają charakter diagonalny (Rys. 5. i 6.) i o rozkładzie gęstości warstw wtedy głównie decyduje skład densymetryczny nadawy. Taki sam charakter macierzy widoczny jest także w innych macierzach modelu.

Diagonalny charakter macierzy A ma miejsce, gdy zdecydowaną większość masy każdej warstwy łoża tworzą frakcje gęstościowe nadawy położonych blisko przekątnej głównej macierzy A .

Można przypuszczać na podstawie rozważanego modelu, że obraz wzbogacania w innych niż osadzarka wzbogalnikach może być podobny mimo braku warstwowej interpretacji. Dla cyklonu z cieczą ciężką taka interpretacja istnieje i jest nią rozkład gęstości na promieniu cyklonu. W szerszym spojrzeniu na całość zagadnienia istotne jest także konieczne duże uśrednianie próbek nadawy i produktów wzbogacania do empirycznej oceny sprawności procesu przynoszące zmiany w ocenie pracy układu odbioru produktu ciężkiego i w ocenie wpływu zmian nadawy na zmianę stratyfikacji. Zmiany te powodują różnice między empiryczną oceną procesu wzbogacania i jego rzeczywistym przebiegiem. Powodem stosowania znacznego uśredniania w empirycznych badaniach efektywności wzbogacania jest bardzo duża zmienność wszystkich parametrów nadawy. Według badań Zapały (Zapała 1988) udział szumu białego w całkowitej zmienności udziałów poszczególnych frakcji gęstościowych nadawy i zawartości popiołu w tych frakcjach wynosi 70–90%. Obecny stan techniki pomi-

arowej stosowanej w przeróbce węgla nie pozwala właściwie ocenić wpływu uśredniania próbek na wynik pomiaru.

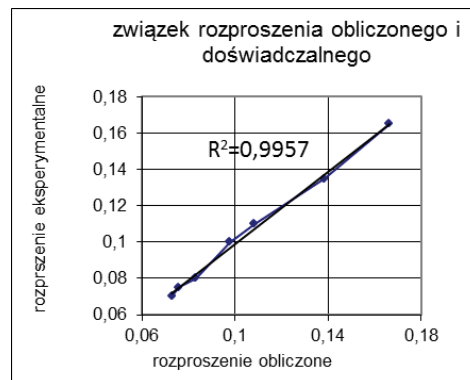
Z działania modelu wynika, że ilość różniących się od siebie krzywych rozdziału jest niewielka i równa ilości pomiarowo rozróżnialnych warstw. Krzywe te wyznacza względnie duża ilość punktów równa ilości frakcji gęstościowych nadawy w zwykle wykonywanych pomiarach mieszczących się w zakresie 8–12 frakcji. Niewielka ilość istotnie różniących się krzywych rozdziału jest także skutkiem braku możliwości dokonania w modelu racjonalnego podziału warstwy gromadzącej względnie dużą część wzbogacanego materiału na dwie lub więcej cieńszych warstw. W działaniu osadzarki taki podział zachodzi losowo w wyniku niedoskonałego działania układu regulacji odprowadzania produktu ciężkiego, co wynika z zasady jego działania. Każdy układ regulacji działa metodą prób i błędów, co inaczej wyraża się koniecznością istnienia niezerowego błędu regulacji.

5. Modelowanie wzbogacania w osadzarkach z użyciem krzywej rozdziału

Istnieje bardzo wiele prac zawierających prognozowanie wyników wzbogacania w osadzarkach opartych o zastosowanie krzywych rozdziału. Jedną z nich wyróżniającą się dużą ilością rozpatrywanych możliwości wzbogacania, jest obszerna praca Pielota (Pielot 2011) związana z analizą pracy układów różnych wzbogalników. W świetle prezentowanego modelu istnieją przynajmniej dwa powody, aby mieć wątpliwości co do poprawności wyników obliczeń uzyskanych z zastosowania krzywych rozdziału. Pierwszym z nich jest funkcja aproksymująca krzywą rozdziału. Najczęściej jako aproksymantę krzywej rozdziału stosuje się dystrybuantę rozkładu normalnego w skali liniowej lub logarytmicznej, funkcję tangens hiperboliczny lub dyskretną funkcję daną w formie tablicy otrzymanej w wyniku eksperymentu. Zdarzają się także dystrybuanty rozkładów typu gamma jak n.p. rozkładu Weibulla (Gottfried 1978). Dystrybuanta rozkładu normalnego w skali liniowej i funkcja tangens hiperboliczny nie modelują zauważalnego doświadczalnie zmniejszenia nachylenia krzywej rozdziału wraz ze wzrostem gęstości cząstek. Przyjmując w modelu $m = 0$, co odpowiada jednakowemu rozproszeniu wszystkich frakcji otrzymuje się krzywą rozdziału identyczną jak dla modelowania tej krzywej dystrybuantą rozkładu normalnego. Dystrybuanta rozkładu normalnego w skali logarytmicznej nie ma sensownego uzasadnienia te-



Rys. 19. Związek obliczonej i doświadczalnej gęstości rozdziału
Fig. 19. Relationship of calculated and experimental separation density



Rys. 20. Związek obliczonego i doświadczalnego rozproszenia
Fig. 20. Relationship of calculated and experimental dispersion

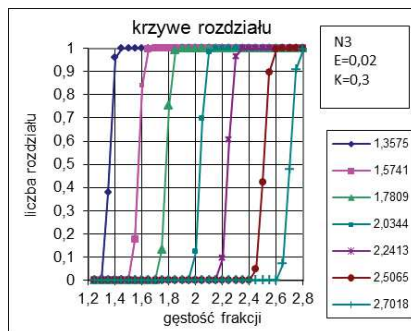
oretycznego i jej stosowanie dla osadzarek powinno być zaniechane. Szersze uzasadnienie takiej tezy zawarte jest w pracy (Głowiak i in. 2019). Modele tablicowe być może najlepiej mogłyby oddawać zmiany nachylenia krzywej rozdziału dla osadzarki, gdyby nie były stosowane zwykle w postaci uogólnionej. Wadą tych modeli jest względnie niska dokładność empirycznego wyznaczania krzywych rozdziału oraz uśrednienie wynikające z ich uogólnienia niedopuszczalne dla krzywych rozdziału dla osadzarek (Głowiak 2019).

Drugim i znacznie ważniejszym z powodów jest dowolny wybór gęstości rozdziału, podczas gdy rozważany model wskazuje na znaczne ograniczenie tej możliwości wynikające z niewielkiej liczby warstw łóża osadzarki rozróżnialnych pomiarowo pod względem ich gęstościowego zróżnicowania. Sytuacja taka jest bardzo wyraźnie widoczna na Rys. 21. i 22. Rys. 21. pokazuje 7 krzywych wybranych z dostępnych dla niskiego rozproszenia 31 krzywych różniących się bardzo niewielkimi zmianami gęstości rozdziału. Na Rys. 22 pokazano wszystkie dostępne krzywe odpowiadające podziałowi łóża na warstwy powstałe w wyniku stratyfikacji zachodzącej z dużym rozproszeniem. Tych krzywych jest tylko 4 co oznacza, że mamy do dyspozycji tylko 4 gęstości rozdziału. Jednocześnie z modelu wynika, że gęstość rozdziału jest związana z podziałem całego rozwarstwowanego łóża na dwa produkty wzbogacania. W tym miejscu konieczne jest przypomnienie związku gęstości rozdziału z gęstością podziału zdefiniowaną w poprzedniej pracy (Głowiak 2020). Gęstość podziału jest to maksymalna gęstość zakresu gęstości tej warstwy, która w całości przez urządzenie rozdzielające rozwarstwiony materiał zostanie skierowana do produktu lekkiego i jednocześnie nie trafi do niego jakakolwiek część materiału sąsiedniej warstwy.

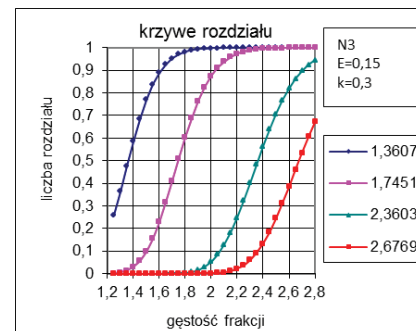
Okazuje się, że jeżeli w omawianym modelu wykreślić jedną z możliwych do obliczenia krzywych rozdziału i przyjąć, że jest wynikiem eksperymentu to można dla tej krzywej z wykresu znaleźć gęstość rozdziału i rozproszenie prawdopodobne. Porównując otrzymane w ten sposób gęstości podziału i rozproszenia prawdopodobne z gęstościami podziału i rozproszeniami frakcji nadawy o gęstości rozdziału obliczonych w modelu stwierdzono występowanie prawie idealnych korelacji dla tych wielkości przedstawionych na Rys. 19 i 20. Ważną cechą tej korelacji jest jej jednokierunkowość, to znaczy, że dla dowolnej istniejącej gęstości podziału zawsze można znaleźć odpowiadającą jej gęstość rozdziału. Natomiast wybierając dowolnie gęstość rozdziału znajdziemy

odpowiadającą jej obliczoną gęstość podziału tylko wtedy, gdy ta gęstość w modelu istnieje. Dowolne wybranie gęstości rozdziału w modelowaniu wzbogacania z użyciem krzywej rozdziału powoduje, że tak wybrany podział może wypaść z bardzo dużym prawdopodobieństwem w miejscu różnym od granicy warstw. Biorąc pod uwagę wymagania jakościowe zwykle narzucone w praktyce przeróbki węgla na produkty wzbogacania oraz możliwą znaczną wysokość warstwy, na której ten podział ma być dokonany o znanej tylko średniej jej gęstości widać, że jest możliwe jednoznaczne przyporządkowanie wysokości podziału warstwy tylko do gęstości podziału.

Przyporządkowanie wysokości podziału warstwy do gęstości rozdziału nie jest już w praktyce jednoznaczne, ponieważ ilość możliwych gęstości rozdziału dla tego podziału jest znacznie większa od ilości istotnie różniących się gęstości podziału. W teorii taka jednoznaczność istnieje, lecz nie jest możliwe jej praktyczne zastosowanie z powodu powstawania znacznych ilości warstw o prawie takiej samej gęstości. Różnice gęstości średniej tych warstw widoczne są w obliczeniach dopiero na piątym miejscu po przecinku. Przy mniej dokładnych obliczeniach te warstwy można pominąć ponieważ gromadzą one bardzo niewielką część masy całego łóża. Ten stan wynika z działania modelu oraz także zaważenia, że znając średnie gęstości warstw można wyznaczyć gęstości podziału, ale na podstawie znanych gęstości podziału nie jest możliwe obliczenie średnich gęstości warstw. W tym rozumowaniu ważny jest fakt, że dla każdej warstwy bez względu na jej wysokość w modelu znana jest tylko jej średnia gęstość oraz najmniejsza i największa gęstość zakresu gęstości tej warstwy. Trzeba jednak zaznaczyć, że skrajne gęstości warstwy są umowne, przyjmuje się bowiem założenie, że są one średnią arytmetyczną średnich gęstości dwu sąsiednich warstw. Doświadczalnie sprawdzenie takiej sytuacji jest niewykonalne głównie z powodu bardzo zróżnicowanej wielkości ziaren wzbogacanego węgla. Z drugiej strony powstają także warstwy, gromadzące znaczne ilości silnie wymieszanych frakcji nadawy charakteryzujące się znacznym zróżnicowaniem granicznych gęstości tych warstw. Taka sytuacja nie jest tylko teoretyczna, lecz jest często spotykana przy trójproduktowym wzbogacaniu węgla koksowego w trzecim przedziale osadzarki decydującym o jakości koncentratu. Łoże w tym przedziale tworzą praktycznie tylko trzy warstwy, dwie względnie wysokie warstwy koncentratu i przerostu oraz względnie niska warstwa frakcji kamiennych. Ponadto



Rys. 21. Krzywe rozdziału osadzarki laboratoryjnej
Fig. 21. Separation curves of a laboratory jig



Rys. 22. Krzywe rozdziału dla przeciętnej sadzarki przemysłowej
Fig. 22. Separation curves of an average industrial jig

czułość pływaka na zmianę położenia warstwy jest najmniejsza dla warstw gromadzących znaczną część masy łoża, co jest skutkiem względnie niewielkich różnic położenia średnich gęstości tych warstw. Zatem przy stałej gęstości pływaka pomiarowego będą miały miejsce znaczne fluktuacje gęstości podziału i związanej z nią gęstości rozdziału spowodowane, nie jak do tej pory się uważa, mało dokładnym pomiarem wykonywanym przez pływak, lecz wewnętrzną naturą zjawiska rozwarstwiania, którą jest istnienie warstw gromadzących znaczne masy silnie wymieszanych różnych frakcji nadawy. Zastosowanie gęstościomierza radiometrycznego może być częściowym rozwiązaniem tego problemu, ponieważ wtedy w rozważanej sytuacji mamy większe zmiany gęstości przy niewielkiej zmianie wysokości warstwy.

Istniejący w całej literaturze dotyczącej krzywych rozdziału brak wyraźnego rozróżnienia gęstości podziału i gęstości rozdziału spowodował powstanie nieprawidłowych hipotez dotyczących procesu osadzania jak np. hipotezy o możliwości odtworzenia składu gęstościowego nadawy na podstawie pomiarów położenie odpowiednio dobranych pływaków (Zapała 1988, Kowol 2010 Cierpisz 2017). Te prace wskazują na możliwość bieżącej identyfikacji składu densymetrycznego nadawy i wykorzystania tej informacji do sterowania procesem wzbogacania węgla w osadzarkach. Z przedstawianego modelu rozkładu warstw w łożu osadzarki wynika jednak, że taka możliwość nie jest osiągalna w praktyce przemysłowego wzbogacania węgla. Argumenty potwierdzające słuszność tego twierdzenia jasno wynikają z Rys. 9–12 pokazujących znaczny wpływ rozproszenia w procesie wzbogacania na rozkłady gęstości i mas warstw w łożu osadzarki. W wyniku działania tej zależności rozkłady położenia środków wysokości zależą w podobnych proporcjach od składu densymetrycznego nadawy jak i od sprawności stratyfikacji, która pozostaje wielkością niedostępną dla bieżących pomiarów w procesie wzbogacania. Znaczny wpływ na rozkłady wysokości warstw ma także pozioma prędkość warstw, która jest też niedostępna pomiarowo w przemysłowym wzbogacaniu (Rys. 14.). Odrębną częścią tego zagadnienia pozostaje brak możliwości poprawnego obliczenia średnich gęstości warstw przy użyciu krzywych rozdziału jak to usiłowano zrobić w w/w pracach.

Oceniając pracę osadzarek z wykorzystaniem krzywych rozdziału generowanych przez rozważany model trzeba pamiętać o poniższych uwagach.

Wszystkie możliwe krzywe rozdziału dla zróżnicowanego rozproszenia cząstek frakcji nadawy są asymetryczne i większość z nich jest ucięta od dołu lub z góry.

Ilość istotnie różniących się od siebie krzywych rozdziału jest niewielka i równa ilości pomiarowo rozróżnialnych warstw. Krzywe te wyznacza względnie duża ilość punktów równa ilości frakcji gęstościowych nadawy w zwykle wykonywanych pomiarach mieszczących się w zakresie 8–12 frakcji.

6. Ocena wzbogalności węgla

Wzbogalność węgla oceniana na podstawie charakterystyki gęstościowej nadawy jest nieaktualna w świetle przedstawionego modelu, ponieważ nadawa o dużej zawartości frakcji o gęstości +2.0 przy całkowitym braku frakcji przerostowych o gęstościach bliskich gęstości rozdziału może być równie trudno wzbogalona jak nadawa zawierająca znaczne ilości frakcji przerostowych. Ponadto dokładne obliczenie wskaźnika Birda nazywanego też wskaźnikiem NGM dla typowego rozkładu gęstości warstw wynikających z modelu jest możliwe tylko dla wzbogacania idealnego. W przypadku wzbogacania rzeczywistego można obliczyć przybliżoną wartość wskaźnika NGM tylko w kilku punktach i ilość tych punktów jest równa ilości możliwych gęstości podziału, a więc bardzo mało dla wszystkich osadzarek przemysłowych.

Dalszy fragment tych rozważań jest przyczynkiem do opisu tego zagadnienia podanego w pracy Budryka (Budryk 1949).

Poniżej podane są wyniki porównania w modelu dwu różnych nadaw zawierających tę samą ilość frakcji węglowych natomiast różniących się znacznie zawartością kamienia i przerostu. Wykresy na Rys. 23. i 24. podają obliczone wartości wskaźnika Birda dla wzbogacania idealnego i rzeczywistego. Rozproszenie wzbogacania rzeczywistego opisane jest wartościami parametrów $E=0,15$ i $m=0,3$. Wskaźnik Birda oznaczony wB zdefiniowany jest następująco:

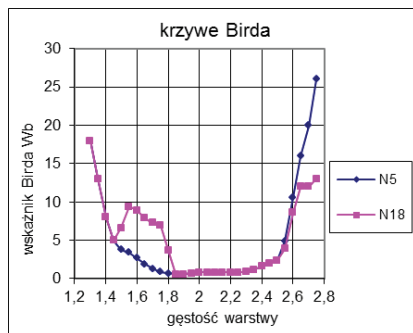
$wB = 100(u_1 - u_2)/u_3$ gdzie:

u_1 – skumulowany udział w nadawie frakcji o gęstości separacji powiększonej o 0,1

u_2 – skumulowany udział w nadawie frakcji o gęstości separacji pomniejszonej o 0,1

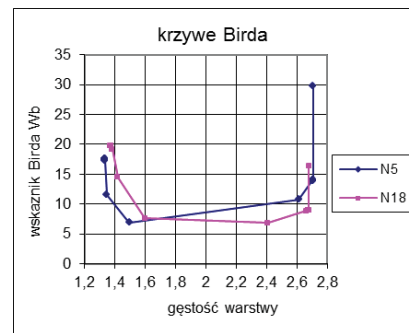
u_3 – skumulowany udział w nadawie frakcji o gęstości mniejszej od 2,0

Szczególne zastrzeżenie w świetle modelu budzi we wskaźniku Birda odrzucenie frakcji nadawy o gęstości większej od 2,0, ponieważ te frakcje zwykle stanowią zdecydowaną większość materiału klasyfikowanego jako odpad i dodatkowo charakteryzujących się największym rozproszeniem w warstwach łoża osadzarki. Z porównania wykresów wskaźnika Birda na Rys. 23. i 24. widać, że wyraźne różnice



Rys. 23. Krzywe Birda dla wzbogacania idealnego ($E_p=0$) dla dwu różnych nadaw

Fig. 23. Bird curves for perfect enrichment ($E_p=0$) of two different feeds



Rys. 24. Krzywe Birda dla wzbogacania rzeczywistego ($E_p=0,15$) dla dwu różnych nadaw

Fig. 24. Bird curves for real enrichment ($E_p=0,15$) of two different feeds

dla wzbogacania idealnego obu nadaw stają się pomijalnie małe dla wzbogacania rzeczywistego. Możliwość tego rodzaju bezpośredniego porównania wynika z twierdzenia o równoważności wzbogacania rzeczywistego i idealnego różnych nadaw podanego w pracy (Głowiak 2020). Warto zauważyć także, że istotną wartością tego wskaźnika wynika tylko z różnicy u_1-u_2 , która jest stosując terminologię używaną w pracy Stępińskiego (Stępiński 1964) rzędnią punktu charakterystyki częstości nadawy dla gęstości frakcji odpowiadającej tej różnicy. Natomiast iloraz $100/u_3$ wynikający z konieczności przeskalowania charakterystyki nadawy po odrzuceniu frakcji $+2,0$ jest powodem braku możliwości normalizacji tego wskaźnika i istotnej jego zależności od składu nadawy. Ta zależność może być łatwo usunięta przyjmując $u_3=100\%$, ale to oznacza brak odrzucenia frakcji nadawy o gęstości większej od $2,0$ i uwolnienie tego wskaźnika od nieistotnych dla niego zmian składu nadawy. Jak można zauważyć z powyższych rozważań zamiar Birda uniezależnienia wprowadzonego przez niego wskaźnika od zawartości w nadawie frakcji $+2,0$ zaowocował całkowicie odwrotnym skutkiem. Trzeba jednak wziąć pod uwagę inną możliwość interpretacji wskaźnika Birda wynikającą z czasu, w którym on powstał. Na przełomie lat dwudziestych i trzydziestych XX wieku prawie całość wydobywanego węgla była urabiana ręcznie co powodowało, że ilość frakcji $+2,0$ w nadawie wynosiła kilka procent (Tromp 1937). W wyniku tego prawie całkowita zmienność wskaźnika Birda zawarta była w czynniku u_1-u_2 , ponieważ wtedy iloraz $100/u_3$ jest prawie stały i niewiele większy od jedności. W ten sposób ujawnił się drugi istotny argument dla zaniechania stosowania wskaźnika Birda w aktualnych warunkach wzbogacania węgla kamiennego.

W tym miejscu warto podać interpretację krzywej Birda wynikającą bezpośrednio z powyższego wyjaśnienia. Ta krzywa jest tylko przeskalowaną i odpowiednio uśrednioną charakterystyką częstości nadawy opisaną nie jak to zwykle się robi dla zawartości popiołu (Stępiński 1964), lecz dla gęstości poszczególnych frakcji gęstościowych. Współczynnikiem skalującym jest iloraz $100/u_3$, a uśrednienie wynika z różnicy u_1-u_2 . Ta różnica jest średnią bieżącą charakterystyki częstości o zakresie uśredniania $0,2$. Powyższe rozważania potwierdzają trafną uwagę Budryka o istotnym wpływie rozproszenia na ocenę wzbogalności.

7. Zmiany w spojrzeniu na proces wzbogacania węgla w osadzarce istotne dla praktyki osadzania i konstrukcji osadzarki

Uwagi dotyczące tego zagadnienia są wynikiem połączenia sytuacji możliwych do dostrzeżenia tylko w przedstawionym modelu z działaniem konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych osadzarki oraz praktyki stosowania tej maszyny w procesie wzbogacania węgla znanych autorowi tej pracy z wieloletniego doświadczenia w regulowaniu punktów pracy poszczególnych podzespołów nowych lub modernizowanych osadzarek.

Bez żadnej wątpliwości najważniejszą czynnością w procesie wzbogacania węgla w wodnej osadzarce pulsacyjnej jest wytworzenie takiego pionowego ruchu wody, który zapewni najlepszą stratyfikację. Tutaj w praktyce realizacji tej czynności napotykać dwa zasadnicze problemy. Pierwszy z nich to brak wystarczającej wiedzy jak taki ruch ma wyglądać mimo wielu różnych eksperymentalnych badań. Obecnie istniejąca wiedza sprowadza się do powiązania wyników wzbogacania z rodzajem zastosowanego cyklu pulsacji. W subiektywnej ocenie autora niniejszej pracy jest to zdecydowanie za mało, ponieważ istotne są także czasowe parametry tych cykli oraz związane z nimi rozluźnianie wzbogacanego materiału. Jeżeli ta wiedza będzie znana to potrzebne są narzędzia do skutecznego zrealizowania takiego ruchu. Najważniejszym z tych narzędzi jest powietrzny zawór pulsacyjny, jeżeli analizę ograniczyć do osadzarek beztłokowych obecnie jedynie stosowanych maszyn w przemyśle węglowym.

8. Wymagania dotyczące konstrukcji powietrznego zaworu pulsacyjnego

Obecnie nie istnieje konstrukcja sterowanego elektrycznie zaworu pulsacyjnego zapewniającego odpowiednią mechaniczną powtarzalność ruchu zaworu niezbędną dla utrzymania stabilności parametrów cyklu pulsacji. Ten stan wynika głównie ze względnie dużej bezwładności ruchomych elementów zaworu i dynamicznych właściwości pneumatycznych siłowników tłokowych najczęściej używanych jako element napędowy zaworu. Ze względu na wymaganą dużą prędkość ruchu zaworu konieczne jest stosowanie urządzenia amortyzującego w krańcowych położeniach zaworu. Urządzenia amortyzujące będące elementem konstrukcji siłownika pneumatycznego nie zapewniają wymaganej długookresowej mechanicznej powtarzalności jego działania. Rozwiązaniem tego problemu jest radykalne zmniejszenie masy ruchomych części zaworu w połączeniu z zastosowaniem dodatkowej amortyzacji w uszczelnieniach zaworu. Innym wariantem rozwiązania może być zastosowanie specjalnych siłowników

hydraulicznych, których najpoważniejszymi wadami są wysoka cena oraz trudne do spełnienia techniczne wymagania dla ich serwisowania w zakładzie przerobczym. Brak właściwego rozwiązania tego zagadnienia potwierdza tezę o nie zwracaniu uwagi przy projektowaniu osadzarki na ważne detale konstrukcji, ponieważ różnego rodzaju zawory pulsacyjne sterowane elektrycznie są stosowane od ponad 50 lat.

9. Stabilizacja poziomu wody w komorze powietrznej

Drugim do tej pory nie rozwiązany problem jest pomiar i stabilizacja poziomu wody w podsitowej komorze powietrznej osadzarki. Ważność tego zagadnienia została dostrzeżona w pracach teoretycznych z lat 70 ubiegłego wieku (Innouchi 1979). Zmiany średniego w cyklu pulsacji poziomu wody w komorze powietrznej są zasadniczym powodem występowania istotnych różnic poziomu wody i jej prędkości w przedziale roboczym osadzarki. Główną przyczyną trudności pomiaru jest obecność piany na powierzchni wody w komorze powietrznej oraz brak możliwości pomiaru pośredniego poprzez pomiar kilku ciśnień w wybranych punktach słupa wody. Także bezpośredni pomiar zmian poziomu wody w przedziale osadzarki nie jest możliwy z powodu znacznych zakłóceń generowanych głównie przez zmiany ilości podawanej równocześnie wraz z nadawą wody górnej. Istotność tej sprawy dla stabilizacji oddziaływania wody na cząstki wzbogacanego materiału jest szerzej wyjaśniona w pracy (Głowiak 2005).

10. Klasyfikacja ziarnowa nadawy

Trzecim i w praktyce najtrudniejszym istotnym warunkiem osiągnięcia wysokiej skuteczności osadzania, wynikającym także z pracy (Surowiak 2006), jest konieczność wąskiej klasyfikacji ziarnowej materiału poddawanego wzbogacaniu w osadzarce. Wniosek ten pozostaje w wyraźnej sprzeczności w praktykę wzbogacania węgla w osadzarkach nie mającą żadnego teoretycznego uzasadnienia. Praktyka ta opiera się na porównaniu znaczenia klasyfikacji ziarnowej przy wzbogacaniu rud metali i węgla kamiennego. Błądność wniosków wyciągniętych z tego porównania wynika z oczywistego faktu braku możliwości skutecznego rozdzielania frakcji gęstościowych o stosunkowo wysokiej gęstości i względnie dużego ich ziarnowego zróżnicowania, jak to ma miejsce w przypadku wzbogacania rud, z możliwością uzyskania takiego rozdzielania w przypadku węgla. Jednakże ta możliwość jest okupiona stosunkowo niską efektywnością procesu, szczególnie wyraźnie widoczną w przypadku wzbogacania węgla w szerokiej klasie ziarnowej jak np. 0–70 mm. Biorąc jeszcze pod uwagę najczęściej spotykaną bardzo wysoką zawartością frakcji ziarnowych 0–2 mm (spotykane przypadki to zawartość tej frakcji ziarnowej w nadawie nawet do 40%) wyraźnie widać, że praktyka taka nie ma technicznego uzasadnienia. Próby jej uzasadnienia ekonomicznego można uznać za wątpliwe, głównie ze względu na sposób rozliczeń w kopalni i w zakładzie przerobczym. Jednocześnie konieczne jest zauważenie, że wszystkie eksperymentalne badania związane z wpływem udziału poszczególnych frakcji ziarnowych na przebieg wzbogacania potwierdzają tezę o zdecydowanie negatywnym oddziaływaniu wzrostu udziału frakcji drobnych na skuteczność wzbogacania w osadzarkach. Nie przeszkadza to jednak w praktyce wzbogacania skierowaniu

tych frakcji do osadzarek. Sytuacja ta wskazuje na zapaść teoretycznych i eksperymentalnych badań nad wzbogacaniem frakcji ziarnowych z zakresu 0,5–2 mm. Jest to całkowicie niezrozumiałe w zestawieniu z istniejącą od paru dziesiątków lat nadprodukcją drobnych ziaren w procesie urabiania wynikającej z dominacji udziału kombajnów w tym procesie i niczym nieuzasadnionym przekonaniem, że wzbogacanie tych ziaren jest wystarczająco skuteczne. Jedynym pozytywnym zjawiskiem ostatnio zauważalnym w tym zakresie jest wzrost stosowania strugów węglowych w kopalni "Bogdanka" (Dyczko 2018).

11. Stabilizacja poziomu warstw o wysokiej gęstości

Aczkolwiek według powyższych rozważań o całkowitej sprawności procesu osadzania decyduje sprawność stratyfikacji trzeba ocenić jak na ten proces wpływa rozdzielanie rozwarstwowanego materiału na dwa produkty wzbogacania. W prawidłowo działającym automatycznym urządzeniu rozdzielającym rozwarstwiony materiał obserwuje się prawie idealną stałość wysokości warstwy produktu ciężkiego mierzoną pływakiem o stałej gęstości (średnia odchyłka regulacyjna nie przekracza 10 mm w pojedynczym cyklu pulsacji lub 1 mm dla odchyłek uśrednionych w okresie jednej minuty dla średniej wysokości łoża około 500 mm). To może być rozumiane jako wystarczająco precyzyjne utrzymywanie poziomu frakcji ciężkich przy zmiennym składzie gęstościowym nadawy i także zmiennym natężeniu jej dopływu.

Jednakże w świetle omawianego modelu precyzyjny pomiar położenia warstwy o gęstości podziału nie jest możliwy przy użyciu pływaków i także gęstościomierza umieszczonego pod progiem przelewowym jak to jest pokazane w pracy Cierpisa (Cierpisz 2012). Stwierdzenie to wynika bezpośrednio z faktu tworzenia się warstw gromadzących znaczną ilość wzbogacanego materiału składających się z frakcji nadawy o bardzo zróżnicowanych gęstościach przy braku możliwości precyzyjnego i stabilnego podziału takich warstw na dwa produkty wzbogacania.

Taka sytuacja jest podstawową przyczyną losowych fluktuacji gęstości rozdziału, których główną i pierwotną przyczyną jest dalekie od optymalnego rozluźnienie łoża osadzarki. Powszechna jest sytuacja grupowania się cząstek łoża praktycznie w 3–5 warstwach z najważniejszymi tego skutkami tj. niską jakością koncentratu i odpadów oraz koniecznością produkowania półproduktu.

12. Uwagi o gęstości rozdziału

Gęstość rozdziału jest bardzo specyficznym pojęciem sprawiającym wiele problemów zarówno w teorii jak i praktyce wzbogacania i dlatego wymaga kilku szczegółowych wyjaśnień. W swej pracy dotyczącej teorii wzbogacania grawitacyjnego Budryk, poszukując związku gęstości rozdziału ze znanymi z teorii pojęciami, zadaje istotne pytanie dotyczące teoretycznej interpretacji gęstości rozdziału pozostawiając je bez poprawnej odpowiedzi (Budryk 1949). Pytanie to brzmi: czym jest właściwie ciężar właściwy (gęstość) separacji. W stanie wiedzy z 1949 roku Budryk mógł udzielić takiej poprawnej odpowiedzi: gęstość separacji jest równa gęstości rozdziału dla wzbogacania idealnego i takiego wzbogacania rzeczywistego, w którym krzywa rozdziału jest symetryczna. W świetle omawianego modelu ta odpowiedź jest następują-

ca: gęstość rozdziału i także separacji jest to graniczna wyższa gęstość warstwy, określonej gęstością średnią i dwiema gęstościami krańców zakresu gęstości, która w całości trafia do produktu lekkiego z warunkiem, że do tego produktu nie trafiają cząstki tworzące niższą (cięższą) warstwę. Próbę odpowiedzi na to pytanie Budryka można znaleźć także w innych pracach, (Cierpisz 2012, Kowol 2010), lecz przedstawiają one tylko teoretyczną możliwość dla nieskończenie cienkich warstw, nie pozwalającej na odpowiednie sprawdzenie eksperymentalne. Jest to wyraźnie widoczne w przedstawionym modelu, w którym istnieją warstwy gromadzące znaczne ilości wzbogacanego materiału zawierającego frakcje o bardzo zróżnicowanych gęstościach. W tych warstwach nie można teoretycznie wyodrębnić nieskończenie cienkich warstw o zróżnicowanej gęstości. Porównanie tych dwu pozornie różnych odpowiedzi pokazuje także ważną teoretyczną różnicę między nimi. Z potencjalnie możliwej odpowiedzi Budryka wynika, że gęstość rozdziału jest gęstością cząstki nadawy, natomiast odpowiedź wynikająca z modelu wiąże tę gęstość z gęstością warstwy. Sprawa ta jest istotna dla rozumienia przebiegu procesu osadzania, gdzie w końcowej jego fazie podziałowi ma dwa produkty podlega nie materiał o densymetrycznym składzie nadawy, lecz łożo osadzarki, którego charakterystyka warstwową jest różna od takiej charakterystyki nadawy.

Teoretycznie nieuporządkowanym zagadnieniem jest zależność gęstości rozdziału od rozproszenia. Gęstość rozdziału jest gęstością tej frakcji nadawy, która po połowie trafi do obydwu produktów wzbogacania. Rozproszenie frakcji gęstościowej nadawy liczbowo równej gęstości rozdziału jest przybliżonym rozproszeniem prawdopodobnym E_p dla procesu wzbogacania określonego tą krzywą rozdziału. Tak określone E_p jest przybliżone, gdy każda frakcja gęstościowa ma inne rozproszenie i dokładne, gdy rozproszenia wszystkich frakcji są jednakowe. Przybliżoność E_p jest skutkiem przyjmowania przy jego wyznaczeniu z krzywej rozdziału, że $E_p = (\rho_{75} - \rho_{25})/2$ także dla sytuacji, gdy $\rho_{75} - \rho_{50} \neq \rho_{50} - \rho_{25}$, co zawsze zachodzi przy różnym rozproszeniu poszczególnych frakcji gęstościowych nadawy.

W tle rozważanego zagadnienia pojawia się niska dokładność empirycznego wyznaczenia krzywej rozdziału. Zdziwiający jest historyczny fakt niezwykle szybkiego przejścia od sformułowania zasady tworzenia krzywej rozdziału (Tromp 1937) do jej zastosowania do oceny skuteczności procesu wzbogacania (Terra 1938) bez przeprowadzenia szczegółowych badań pozwalających ocenić stosowanie w praktyce postaci funkcji możliwie dokładnie aproksymującej empiryczną krzywą rozdziału. Powyższa uwaga wynika z zestawienia w/w prac Trompa i Terra'y z jednoczesnym brakiem w literaturze z tego okresu prac związanych z dokładnością empirycznego wyznaczenia krzywej rozdziału. W opinii autora taka praca była potrzebna i mogła się pojawić tylko wyniku starannie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, ponieważ Tromp i Terra nie podali prawidłowych związków tej krzywej z pojęciami istniejącymi w rachunku prawdopodobieństwa, które zastosowali do teoretycznej interpretacji wyników swoich prac. Trzeba tutaj dodać, że takie prawidłowe wyjaśnienie pojawiło się dopiero 50 lat później w pracy Zapały (Zapała 1988). Ta sprawa wyraźnie pokazuje meandry rozwoju teorii wzbogacania grawitacyjnego, ponieważ w tym okresie pojawiła się znaczna ilość prac związanych z krzywymi rozdziału,

w tym także normy dotyczące empirycznego wyznaczenia tych krzywych, które stały się podstawą dla doświadczalnej oceny skuteczności wzbogacania stosowanej także obecnie. Nie można zapominać, że istnieją także inne rzadziej używane metody oceny procesu wzbogacania oparte o krzywą rozdziału takie jak wskaźnik Driessena (Belugou i in. 1950) i wskaźnik Ar (Swamson i in. 2008) dokładniej charakteryzujące sprawność procesu wzbogacania.

W praktyce wzbogacania węgla w osadzarkach pojęcie gęstości rozdziału nie jest używane przez personel obsługujący te maszyny jak i dozór kontrolujący ich pracę. Jest tak dlatego, że żaden z parametrów istotnych dla oceny produktów przemysłowego wzbogacania nie ma jednoznacznego i bezpośredniego powiązania z gęstością rozdziału. Istotne jest także to, że poznanie gęstości rozdziału nie jest zasadniczym celem badania krzywej rozdziału. Nie mniej ważny jest fakt, że ta gęstość jest niezwykle rzadko badana, ponieważ podlega znacznej zmienności w wyniku niekontrolowanych zmian ilości i składu nadawy oraz znacznych wahań rozproszenia powodowanych głównie zmianami składu ziarnowego nadawy. Nie bez znaczenia jest także wysoki koszt eksperymentalnego wyznaczenia krzywej rozdziału.

W teorii gęstość rozdziału jest używana do modelowania wyników wzbogacania przy użyciu krzywych rozdziału, obliczania zbędnego i błędnego wskaźnika jakości wzbogacania nazywanego imperfekcją (Głowiak i in. 2019) oraz obliczania krzywej rozdziału z krzywej uogólnionej. W omawianym modelu gęstość rozdziału jest użyta tylko dla pokazania związku działania modelu z obliczanymi przez ten model krzywymi rozdziału. Z historii wprowadzenia do literatury pojęcia rozproszenia prawdopodobnego E_p wynika, że gęstość rozdziału była i jest koniecznym dodatkowym parametrem charakteryzującym jakość wzbogacania. Rozproszenie E_p zmienia się dla innego podziału tego samego rozwarstwowanego materiału i dlatego gęstość rozdziału związana jest ściśle z przyjęciem rozproszenia prawdopodobnego jako miary skuteczności wzbogacania. Wspomniane już wyżej wskaźniki Driessena i Ar nie są wprost związane z wartością tej gęstości. Sprawa użycia krzywej rozdziału do oceny skuteczności wzbogacania w przemysłowej osadzarce ma jeszcze jeden ważny aspekt wspomniany w rozważaniach o ograniczeniach tej krzywej polegający na istnieniu tylko jednej lub dwu pełnych krzywych przy podziale rozwarstwowanego łoża na całkowitą liczbę gęstościowo zróżnicowanych warstw. To zagadnienie pojawiło się pośrednio już w podstawowej pracy Trompa, niestety bez właściwego wyjaśnienia.

13. Propozycja zaniechania opisu zjawisk zachodzących w procesach wzbogacania grawitacyjnego z zastosowaniem funkcji ciągłych

W podręcznikach wzbogacania grawitacyjnego jak np. (Stępiński 1964) szczegółowo przedstawione jest przekształcenie dyskretnej wartości empirycznych pomiarów charakterystyki nadawy w funkcje ciągłą, natomiast brak jest uzasadnienia dla wykonania tego przekształcenia. W nowszych podręcznikach w tym zakresie nie zaszły istotne zmiany, co można zauważyć w opracowaniu Drzymały (Drzymała 2009). Być może dawniej takim uzasadnieniem dla stosowania funkcji ciągłych była praktyka przybliżonych obliczeń wykresalnych i względy dydaktyczne. Obecnie takie

uzasadnienie straciło sens, szczególnie z powodu nieistnienia funkcji ciągłych dostatecznie dokładnie aproksymujących przebieg funkcji dyskretnej opisujących rozkłady frakcji gęstościowych w nadawie oraz powszechnego stosowania obliczeń cyfrowych. Ponadto w opisie tych działań pomięto kwestie dokładności przekształcenia empirycznej funkcji dyskretnej w funkcji ciągłą oraz dokładności wykonywanych pomiarów i obliczeń. Opis wzbogacania opierający się tylko na funkcjach dyskretnych w żadnej mierze nie jest gorszy od opisu ciągłego, a jego zaletą jest to, że pokazuje prawidłowo sytuacje, które w modelu ciągłym nie są możliwe do prawidłowego rozważenia. Przykładem może być fakt, że z rozważań ciągłych krzywych rozdziału nie wynika możliwość powstawania warstw gromadzących znaczne ilości wymieszanych frakcji urobku. Taka sytuacja jest wyraźnie widoczna z modelowania dyskretnego dla różnej liczby frakcji gęstościowych. Zwiększenie ich liczby zwiększa tylko dokładność obliczeń gęstości i mas poszczególnych warstw bez istotnej zmiany ich rozkładów. To zwiększanie liczby frakcji ma jednak poważne ograniczenie polegające na pogorszeniu dokładności obliczenia mas frakcji w warstwach w miarę zbliżania się rozkładu dyskretnego do rozkładu ciągłego. Tego rodzaju ograniczenie widoczne jest już dla 32 frakcji przy konieczności większej liczby iteracji i jest ono podane w opisie modelu.

Warto także zauważyć, że używana w różnych zastosowaniach krzywa rozdziału jako funkcja ciągła nie istnieje, ponieważ ta krzywa jest tylko wykresem kilku lub kilkunastu liczb rozdziału wynikających z pomiaru lub obliczenia. Liczby te są znane tylko dla dyskretnych gęstości frakcji charakterystyki nadawy i mają tę właściwość, że mogą odpowiadać gęstości frakcji nadawy, której nie ma w jej składzie densymetrycznym. Tendencja rysująca się z porównania obliczeń w modelu rozkładów mas dla różnej liczby frakcji gęstościowych nadawy wyraźnie pokazuje, że nieciągły rozkład gęstości frakcji nadawy może generować zupełnie niespodziewany w rozważaniach funkcji ciągłych rozkład mas i gęstości warstw dla rozprożeń najczęściej spotykanych w praktyce wzbogacania węgla. W tej sytuacji pojawia się zasadnicze pytanie jaką korzyść przynosi stosowanie opisu ciągłego. W opinii autora tej pracy opis ciągły nie wnosi żadnej istotnej korzyści i wynika tylko z przyzwyczajenia do jego stosowania. Zauważając, że celem poszukiwania matematycznego opisu zjawiska jest znalezienie możliwie prostego opisu najlepiej przedstawiającego modelowane zjawisko, zastosowanie opisu dyskretnego w tym przypadku wydaje się być naturalne. Oczywiście takie podejście do zagadnienia nie wyklucza istnienia wyjątkowych sytuacji, w których zastosowanie opisu ciągłego przynosi pewne korzyści. Stąd wniosek, że głównie stosowanym opisem matematycznym procesu wzbogacania grawitacyjnego powinny być funkcje dyskretne. W przedstawionym modelu jedyną użytą funkcją ciągłą jest dystrybuanta rozkładu normalnego, a jej użycie jest uzasadnione tylko dokładnością modelowania procesu wzbogacania. W rezultacie modelowania otrzymuje się wartości obliczanych zmiennych tylko w konkretnych punktach, co jest skutkiem znajomości empirycznej charakterystyki nadawy tylko w pewnej liczbie punktów. Użycie w tym miejscu funkcji dyskretnej prowadziłoby do utraty zachowania bilansu masy frakcji nadawy rozpraszanych w różnych warstwach.

Przedkładana propozycja ma oparcie w naukowej przeszłości w postaci przejścia do opisu funkcjami dyskretnymi

zjawisk rozpatrywanych w automatyce (Niederliński 1983), które zaczęło się ok. 50 lat temu. Ta zmiana została wymuszona gwałtownym rozwojem techniki cyfrowej i pojawieniem się wielu nowych możliwości jakie ona stwarza. Niestety w technice wzbogacania surowców mineralnych nic podobnego się nie wydarzyło i przy obecnej tendencji zmian najprawdopodobniej rychło się nie wydarzy. Taki stan może być wynikiem zdominowania tych zagadnień przez sposób myślenia zbyt silnie związany z problemami środowiska górniczego, które nie jest skłonne do szybkiego i trafnego reagowania na istotne zamiany zachodzące w jego otoczeniu.

14. Najważniejsze wnioski wynikające z analizy działania modelu

Istnieją dwa zasadniczo różniące się między sobą obrazy zjawisk zachodzących w procesie wzbogacania, prawdopodobnie nie ograniczające się do wodnych osadzarek pulsacyjnych, istotnie związanych ze skutecznością stratyfikacji materiału w łozu osadzarki. Szczególnie ważny jest obraz dla rozprożeń $E_p > 0,04$ do tej pory niewystarczająco opisany w literaturze. W tym zakresie całkowicie zmienia się rozkład gęstości i mas warstw w łozu osadzarki negatywnie wpływając na skuteczność wzbogacania.

W przedstawionym dyskretnym modelu istotnego znaczenia nie ma ilość frakcji gęstościowych nadawy, która zmienia tylko dokładność obliczeń, a pozostaje bez wpływu na różnice w rozkładach gęstości poszczególnych warstw w łozu osadzarki. Można przypuszczać, że istnieje optymalna dla modelowania ilość frakcji gęstościowych wynikająca z pogarszania się dokładności obliczeń mas poszczególnych frakcji w warstwach łoza wraz ze wzrostem ilości frakcji w modelowaniu.

Ważną cechą modelu jest możliwość całkowitego rozdzielania analizy dwu procesów równoległe zachodzących w osadzarce to jest procesu stratyfikacji wzbogacanego materiału i procesu podziału rozwarstwowanego materiału na dwa produkty wzbogacania.

Przedstawione w tej pracy wyniki działania modelu wyraźnie wskazują na istnienie w procesie osadzania sprzężenia zwrotnego zmieniającego gęstość warstw. Jest ono niezauważone w istniejących opisach tego procesu. Z przedstawionych rozważań nie wynikają przesłanki związane z dynamicznymi własnościami tego sprzężenia, co także jest skutkiem niedostatecznego zbadania dynamiki procesu osadzania.

Zjawiska dostrzeżone w modelu pozwalają wskazać prawidłowe kierunki zmian w konstrukcji osadzarek oraz w praktyce stosowania procesu osadzania we wzbogacaniu węgla kamiennego.

Biorąc pod uwagę możliwości poprawy sprawności wzbogacania w osadzarce wynikające z rozważanego modelu w zestawieniu z działaniem cyklonu w cieczą ciężką, który także daje się dobrze opisać tym modelem, trzeba uznać znaczną przewagę sprawności cyklonu okupioną dużo wyższymi kosztami wzbogacania. Głównym źródłem tej przewagi jest możliwość skutecznego wzbogacania w szerszej niż w osadzarce klasie ziarnowej wynikająca z wysokich wartości sił separujących działających przy bardzo dużym rozluźnieniu wzbogacanego materiału.

Aktualny stan teorii wzbogacania grawitacyjnego bardzo przypomina sytuację istniejącą w rachunku prawdopodo-

bieństwa około 100 lat temu, kiedy istniało wiele niepowiązanych ze sobą gałęzi tego rachunku. Dopiero prace Kołmogorowa doprowadziły ten rachunek do stanu uporządkowanej teorii stanowiącej pełnoprawną gałąź matematyki.

Tego rodzaju unifikująca praca byłaby bardzo potrzebna dla uporządkowania wielu wzajemnie niespójnych modeli istniejących w zagadnieniach wzbogacania grawitacyjnego.

Literatura – References

1. Belugou M. Ulmo M. (1950) Représentation des résultats d'une épuration. Conférence Internationale sur la Préparation des Charbons Paris Juin 1950 A3 p. 16-20
2. Budryk W. (1949) Wyniki działania płuczek i wialni w świetle teorii Przegląd Górniczy 1949 nr 9 (620) s. 1021 -1028
3. Cierpisz S. (2012) Automatyczna regulacja procesu wzbogacania węgla w osadzarkach. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice s. 13-15, 28-33, 53-81, 89-106
4. Cierpisz S., Joostberens J., Kowol D. 2010 Model układu odbioru produktów w procesie wzbogacania węgla w osadzarce. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa Nr 1 (467) Styczeń 2010 s. 15-19
5. Cierpisz S. (2017) A dynamic model of coal products discharge in a jig. Minerals Engineering 105 (2017) 1-6 p.1-3
6. Drzymała J. (2009) Podstawy mineralurgii. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, s. 48-51
7. Dyczko A. (2018) Metodyka oceny wpływu zanieczyszczenia urobku na efektywność procesu produkcji węgla kamiennego na przykładzie LW Bogdanka S.A. Praca doktorska AGH w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii s.135-140
8. Głowiak S. (2019) Powody konieczności korekty pewnej części teorii wzbogacania grawitacyjnego. Inżynieria Mineralna nr 1 (43) s.199-209
9. Głowiak S. (2020) Założenia probabilistycznego modelu rozkładu gęstości ziaren w warstwach łoża osadzarki. Inżynieria Mineralna nr 1 (43) s.211-220
10. Głowiak S. (2020) Probabilistyczny model rozkładu gęstości ziaren w warstwach łoża osadzarki. Inżynieria Mineralna nr 1 (45) s.187-198
11. Głowiak S. (2022) Doświadczalne sprawdzenie poprawności modelu dyskretnego rozkładu gęstości ziaren w łożu osadzarki. Inżynieria Mineralna 1 (47) s. abc-xyz
12. Głowiak S., Tora B. On the desirability of abandoning the use of imperfection as an indicator of the effectiveness of gravity separation coal in water pulsation jigs XIX International Coal Preparation Congress Congress Proceedings Vol.1 s. 285-295
13. Gottfried B.S. (1978) A generalization of distribution data for characterizing the performance of coal cleaning equipment. Mineral Processing p.1-20
14. Jinnouchi Y. Kawashima S. (1978) How to Predict and Optimize the Pulsation in the Air-Pulsated Jigs VIII International Coal Preparation Congress Donieck B5 p.105-136
15. King R.P. (1987) A quantitative model for gravity separation unit operations that rely on stratification. APCOM 87. Proceedings of the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries, Volume 2 Metallurgy. Johannesburg SAIMM 87 p.141-151
16. Kowol D. (2010) Wpływ zmian parametrów nadawy na efekty działania pływakowego układu sterowania odbiorem produktów osadzarki. Praca doktorska Politechnika Śląska w Gliwicach Wydział Górnictwa i Geologii s. 68-81, 88-94
17. Niederliński A. (1983) Systemy i sterowanie. Wstęp do automatyki i cybernetyki technicznej. PWN Warszawa s.256-361
18. Pielot J. (2011) Wielokryterialna optymalizacja produkcji układów technologicznych grup wzbogacalników grawitacyjnych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, s.57-140
19. Stępiński W. (1964) Wzbogacanie grawitacyjne PWN Łódź-Warszawa-Kraków s. 16- 39
20. Surowiak A. (2006) Wpływ rozkładu właściwości fizycznych i geometrycznych ziaren na dokładność rozdziału w osadzarce na przykładzie węgla. Rozprawa doktorska AGH, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii Kraków s. 136-146
21. Swanson A., Atkinson B., Weale W. (2008) Design and Operational Data for the Optimum Utilisation of Large Diameter Dense Medium Cyclone XV International Coal Preparation Congress and Exhibition, China University of Mining and Technology Press Pekin p. 297

22. Terra A. (1938) Essai d'une theorie de lavage. Reveue l'Industrielle Minerale nr 425 p. 383-403
23. Tromp K.F. (1937) Neue Wege für Beurteilung der Aufbereitung von Steinkohlen. Glückauf nr 6 s.125-131, nr 7 s.151-156
24. Zapała W. (1988) Opracowanie i cyfrowe badania symulacyjne algorytmów sterowania procesu wzbogacania węgla z wykorzystaniem pomiaru rozkładu frakcji densymetrycznych w łożu osadzarki Praca doktorska. Politechnika Śląska, Instytut Elektryfikacji i Automatykacji Górniczo-Przemysłowej Gliwice s. 48-68

Changes in the Image of Sedimentary Enrichment Resulting from the Analysis of the Operation of the Probabilistic Model of the Distribution of the Density Layers in the Jig Bed

The results of modeling and experimental verification of the probabilistic model of layer density distribution in the jig bed allow to notice significant differences in the image of the enrichment process in the jig resulting from this model and the understanding of this process so far. The noticed differences are of great importance both for its theoretical description and for the practice of coal enrichment. They also allow to indicate the right direction of changes in the construction of the jig. This work is an overview of the observed differences and their significance for the correct understanding of the enrichment process in the jig. Among these details, the so far not noticed changes in the density distributions of the bed layers and the distribution of masses in individual layers related to the dispersion of particles of the enriched material are of great importance.

Keywords: *enrichment of minerals, coal separation process in a jig, modeling of enrichment in a pulsed water jig*