

Stanisław BŁASZCZYŃSKI

Janusz STEINHOF

Mirosław KURZYCA

WZBOGACANIE DROBNOZIARNIONYCH WĘGLI W SEPARATORACH STRUMIENIOWO-WACHLARZOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań nad wzbogacaniem drobnoziarnistych węgla w strumieniowo-wachlarzowym separatorze typu "Spencer". Wyznaczono najbardziej korzystne warunki wzbogacania przez odpowiedni dobór kąta pochylenia rynny separatora oraz jego obciążenia nadawą.

1. Wstęp

Wzbogacanie drobnoziarnistych węgla jest obecnie problemem nader istotnym ze względu na zwiększający się udział ziarn drobnych w urobku w miarę wzrostu stopnia mechanizacji urabiania, ładowania i transportu. Skłania to do poszukiwania możliwie tanich i skutecznych metod ich wzbogacania.

W Instytucie Przeróbki Kopalni Politechniki Śląskiej przeprowadzono próby zastosowania separatorów strumieniowo-wachlarzowych do wzbogacania drobnoziarnistych węgla. Separatory tego typu charakteryzują się prostą konstrukcją, dużą wydajnością jednostkową oraz niskimi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi. Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie możliwości stosowania oraz ustalenie najbardziej korzystnych parametrów technologicznych separatorów strumieniowo-wachlarzowych do wzbogacania mwałw węglowych o uziarnieniu 2 - 0,1 mm.

2. Podstawy teoretyczne procesu gęstościowego rozdziału minerałów w separatorze strumieniowo-wachlarzowym

Istnieje dużo teorii na określenie głównych przyczyn gęstościowego rozdziału minerałów w strumieniu cieczy poruszającej się w rynnie separatora. Wielu badaczy uważa, że głównym czynnikiem powodującym ten rozdział są występujące różnice w prędkościach poruszania się minerałów o różnych ciężarach właściwych po dnie rynny separatora. Poglądy takie wyrażają J. Finkiej i F. Taggart [1]. Według B. Laszczenki na charakter rozmieszczenia ziarn minerałów o różnych ciężarach właściwych w poszczególnych war-

stwach strumienia cieczy główny wpływ ma wielkość pionowej składowej prędkości powstającej w wyniku turbulencji strumienia. Jeśli rozpatrywać działanie pionowej składowej prędkości na ziarno poruszające się w zawieszynie o różnym stopniu zagęszczenia, to położenie ziarn w strumieniu powinno być uwarunkowane ciężarem poszczególnych ziarn tak jak przy sedymentacji skrępowanej. Zgodnie z tym stwierdzeniem ziarna o różnych ciężarach właściwych lecz o zróżnicowanych wielkościach powinny w strumieniu cieczy rozmieszczać się od ziarn największych w strefie przydennej do ziarn najmniejszych w strefie powierzchniowej. Według P. Helfrichta [2], [3] ruch ziarn na całej długości rynny odbywa się w stanie zawieszonym dzięki istnieniu pionowej składowej prędkości; ziarna o większych ciężarach właściwych przedostają się do najniższych partii strumienia tworząc warstwę o dużej koncentracji, co autor tej koncepcji określa mianem "pełzającej pościeli". Warstwa ta powinna być rozluźniona, przez co zostaną uwolnione ziarna minerałów o mniejszych ciężarach właściwych, które przejdą do wyższych warstw.

Według A. Bogatowa [4] i [5] na ziarna minerałów w rynnie separatora działają następujące siły:

- siła tarcia skierowana przeciwnie do kierunku ruchu ziarna,
- siła ciężkości, którą można rozłożyć na dwie składowe: prostopadłą i równoległą do nachylonej płaszczyzny dna separatora,
- siła dynamicznego oddziaływania strumienia na ziarno, zależna od prędkości strumienia i średnicy ziarna,
- siła pionowo-podnosząca ziarno, która powstaje wskutek różnic w prędkościach poszczególnych warstw strumienia cieczy. Siła ta pojawia się tylko^o w warunkach przepływu turbulენტnego.

Istnienie siły pionowo-podnoszącej potwierdziły liczne badania. Wartość jej jest zależna od średniej prędkości strugi cieczy, od stopnia chropowatości dna oraz ścian bocznych rynny separatora. Wartość prędkości pionowej określił A. Wielikanow [1] jako liniową funkcję średniej prędkości strumienia

$$v_p = \frac{1}{5} v_{sr}$$

gdzie:

v_p - prędkość pionowa,

v_{sr} - średnia prędkość strumienia zawiesziny.

Inni autorzy podają wzór

$$v_p = \left(\frac{1}{15} - \frac{1}{77} \right) v_{sr}$$

Przedstawione wzory nie uwzględniają jednak tak istotnego parametru jak wysokość strumienia zawiesiny, co - jak stwierdzono - wpływa na prędkość pionowo-podnoszącą równie istotnie jak wartość prędkości średniej strumienia zawiesiny. Ponieważ w znacznej części rynnny separatora ruch zawiesiny odbywa się w warunkach laminarnych, dlatego też siła ta w tej części rynnny separatora ma wartość znikomą i może być w dalszych rozważaniach pominięta. Ziarno minerału zostaje przemieszczone pod wpływem wymienionych sił, z których największe znaczenie odgrywa siła hydrodynamicznego naporu cieczy, a która to siła jest funkcją prędkości strumienia zawiesiny. W czasie przepływu ziarno może być "zawieszona" w strumieniu cieczy lub też toczyć się po dnie rynnny. W warunkach przepływu laminarnego ruch ziarna odbywa się po dnie rynnny, w tym przypadku mamy do czynienia z tzw. wleczeniem ziarn. W warunkach przepływu turbulentnego ruch ziarn odbywa się w stanie "zawieszenia" ziarn w strumieniu. Prędkość ruchu ziarn w warunkach laminarnych wg Finkéja [1] wyraża się wzorem:

$$v = \frac{v_{\text{sr}} \cdot d}{H} \left(2H - \frac{d}{H} \right) - v_0 \sqrt{f - \sin \alpha}$$

gdzie:

- v_{sr} - średnia prędkość strumienia zawiesiny,
- d - średnica ziarna,
- H - wysokość strumienia,
- v_0 - końcowa prędkość swobodnego opadania ziarna w wodzie,
- f - dynamiczny współczynnik tarcia ziarna o dno,
- α - kąt pochylenia płaszczyzny.

Praktyczna przydatność przedstawionego wzoru jest jednak ograniczona z powodu trudności w określeniu poszczególnych wielkości. We wzorze tym nie uwzględniono również wzajemnego oddziaływania ziarn, pomimo tego że ruch ich w rynnny separatora odbywa się w warunkach skrępowanych. Dla rynnny o zmiennym przekroju rzeczywisty przekrój jest funkcją dwóch wielkości

$$S = f(H, l_g)$$

gdzie:

- H - wysokość strumienia,
- l_g - odległość danego przekroju od punktu początkowego rynnny.

Formuła prędkości ruchu wody dla tego przypadku wywodzi się z zastosowania równania Bernoulli'ego, które ma skomplikowaną matematyczną postać dającą przy obliczeniu dowolnie przybliżone wartości. Dlatego, chociaż działanie strumienia cieczy na ziarno minerału przy laminarnym i turbulentnym ruchu

nie jest jednakowe w rezultacie złożoności ruchu samej cieczy, czynniki powodujące przemieszczanie się ziarn w strumieniu w warunkach przepływu turbulentnego w obecnym czasie wyznacza się doświadczalnie.

Rezultaty badań Bogatowa [1], których celem było określenie średnich prędkości ruchu ziarn o różnych ciężarach właściwych i różnych wielkościach w końcowym odcinku rynny, świadczą o zmianie charakteru zależności prędkości ruchu ziarn od ich średnicy. Ziarna o większych średnicach zmniejszają swoją prędkość, natomiast ziarna mniejsze prędkość tę zwiększają. Zjawisko to pozwala sądzić, że w tej części rynny następuje rozdział ziarn o większym ciężarze właściwym w poszczególnych warstwach strumienia zawiesiny. Tendencja rozdziału ziarn ciężkiego minerału w warstwach strumienia na końcu rynny separatora wykazuje, że rozdział ten występuje w kierunku charakterystycznym dla gęstościowego rozdziału ziarn w warunkach ich wzajemnego oddziaływania.

Jak wspomniano, laminarny lub zbliżony do laminarnego ruch zawiesiny w pierwszej połowie rynny separatora, w dalszych częściach rynny przechodzi w ruch o charakterze turbulentnym, przy czym turbulentność tego ruchu osiąga max. wartość na końcu rynny. W czasie ruchu turbulentnego powstają prądy wirowe cieczy, które są źródłem pionowej składowej prędkości. Przegrupowanie ziarn frakcji ciężkiej w końcu rynny potwierdza istnienie tej prędkości, natomiast rozdział ziarn o mniejszym ciężarze właściwym zachodzi niezależnie od istnienia tej prędkości i odbywa się na całej długości rynny separatora. Ziarna frakcji lekkiej w końcowej części rynny poruszają się w górnych warstwach strumienia zawiesiny ze znacznymi prędkościami, z czego wynika zmniejszenie czasu przebywania w strefie ruchu turbulentnego. Poruszanie się tych ziarn w wyższych warstwach strumienia powoduje znikome działanie na te ziarna pionowej składowej prędkości, której wartość w tych warstwach jest mniejsza. Proces gęstościowego rozdziału minerałów w rynnie separatora wachlarzowego można więc podzielić na dwa etapy. W pierwszym etapie strumień zawiesiny porusza się ruchem laminarnym. Na tym etapie występuje tzw. wleczenie ziarn płynących w sąsiednich warstwach. Warstwa najniższa ma sprzężenie cierne z dnem rynny i porusza się z niewielką prędkością. Równocześnie następuje rozdział ziarn na poszczególne warstwy strumienia według ich ciężarów właściwych i wielkości. Na etapie drugim, w którym ruch strumienia zawiesiny odbywa się w warunkach turbulentnych, dalszy rozdział ziarn odbywa się w wyniku działania pionowej składowej prędkości, przy czym w większym stopniu rozdziela się ziarna minerału ciężkiego.

2. Opis sposobu prowadzenia badań i dyskusja wyników

Badania prowadzono na stanowisku badawczym przedstawionym na rys. 2. Do wzbogacania zastosowano separator wachlarzowy typu "Spencer" (rys. 1), z tym że w miejsce noży rozdzielających wachlarz wpływającej zawiesziny zastosowano 8-sekcyjny odbiornik. Zastosowanie odbiornika pozwoliło na bardziej dokładny rozdział wpływającej z rynny separatora zawiesziny na frakcje, w których oznaczono zawartość popiołu oraz określono ich procentowy wychód. Wzbogacaniu poddano węgiel w klasach ziarnowych 1,0-0,1 mm oraz 2,0-0,3 mm i odpowiednich średnich zawartościach popiołu $\alpha = 13,1\%$ i $\alpha = 12,0\%$. Nadawę do wzbogacania stanowiła zawieszina węgla o zagęszczeniu masowym $\beta = 450$ g/l.

Wymiary separatora:

długość rynny roboczej	-	900 mm
szerokość komory nadawczej	-	300 mm
szerokość szczeliny wypustowej	-	30 mm
wysokość komory nadawczej	-	600 mm

Wzbogacanie prowadzono przy następujących zmiennych parametrach:

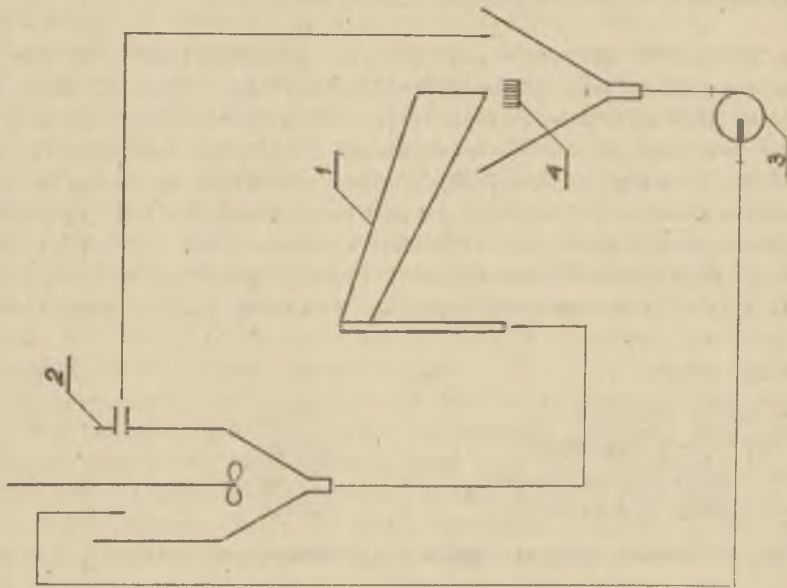
- kąt pochylenia rynny,
- wydajność separatora.

Na podstawie otrzymanych wyników obliczono współrzędne oraz wykreślono krzywe wzbogacania. Przy założonym wychodzie koncentratu $\tau_k = 70\%$ odczytano z wykresów procentową zawartość popiołu w koncentratkach, co umożliwiło porównanie wyników doświadczeń.

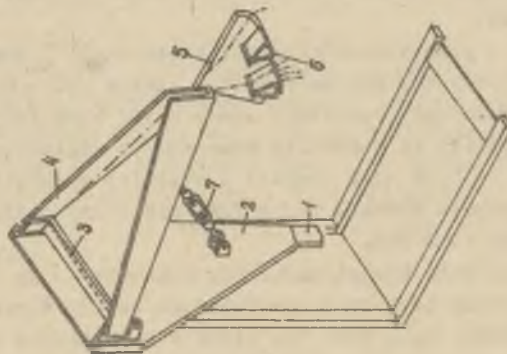
Wyniki badań przedstawiono w tabl. 1 i 2, zaś na wykresach 3 i 4 ukazano rozkład zawartości popiołu w poszczególnych frakcjach dla najbardziej korzystnych warunków wzbogacania węgla w klasie ziarnowej 1,0 - 0,1 i 2,0 - 0,3 mm.

W oparciu o przeprowadzone próby wzbogacania i analizę wyników jako najbardziej korzystny dla materiału w klasie 1,0 - 0,1 przyjęto kąt pochylenia rynny roboczej separatora równy $6^{\circ}30'$ przy wydajności $2,5$ m³/h. Warunki te pozwoliły na uzyskanie koncentratu węglowego o średniej zawartości popiołu $\alpha = 7,0\%$ oraz odpadów o średniej zawartości popiołu $\beta = 28\%$. Wychód koncentratu wynosił $\tau_k = 70\%$, zaś uzysk części palnych i lotnych w koncentracie $\varepsilon = 75\%$.

Zwiększenie kąta nachylenia rynny separatora do $15^{\circ}10'$ spowodowało wzrost zawartości popiołu w koncentracie do $10,4\%$ przy identycznym wychodzie koncentratu $\tau_k = 70\%$. Dla węgla o uziarnieniu 2,0 - 0,3 mm najkorzystniejszy kąt pochylenia rynny wynosił $8^{\circ}15'$ przy wydajności separatora $Q = 2,5$ m³/h. W warunkach tych otrzymano koncentrat o średniej zawartości popiołu $\alpha = 7,3\%$ przy wychodzie $\tau_k = 70\%$ i odpady o średniej zawartości popiołu $\beta = 23,3\%$. Uzysk części palnych i lotnych w koncentracie wynoszą $\varepsilon = 73,8\%$, zaś uzysk popiołu w odpadach wynosił $\varepsilon' = 57,8\%$. Przy próbach zmniejszenia kąta pochylenia rynny roboczej separatora poni-



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego
 1 - separator wachlarzowy, 2 - mieszalnik z przelewną, 3 - pompa, 4 - odbiornik sekcyjny



Rys. 1. Separator wachlarzowy typu "SPENCER"

1 - rura doprowadzająca nadawę, 2 - komora nadawcza nadawcy, 3 - próg przelewny, 4 - rynnna separatora, 5 - płyta rozdzielająca, 6 - kliny ruchome, 7 - podpora o zmiennej długości

Tablica 1

Wyniki wzbogacania mułu węglowego w klasie 1-0,1 mm
obliczone na podstawie wykreślonych krzywych wzbogacania
przy założeniu wychodu koncentratu $\tau_k = 70\%$

Kąt pochylenia rynny roboczej	Wydajność separatora	Zawartość popiołu w koncentracie	Zawartość popiołu w odpadach	Uzysk części palnych i lotnych w koncentracie	Uzysk popiołu w odpadach
stopień	m ³ /h	%	%	%	%
6°30'	2,5	7,0	28,0	75,0	63,1
9°19'	2,5	7,3	28,3	75,0	62,9
10°	2,5	7,2	27,2	74,9	61,8
11°16'	2,5	8,1	26,1	74,4	58,0
15°10'	2,5	10,4	21,9	72,5	48,6
6°30'	3,2	7,4	28,4	75,1	62,2
9°19'	3,2	7,3	28,0	75,0	62,0
10°	3,2	7,4	27,7	74,9	61,5
11°16'	3,2	10,2	21,2	72,7	47,1

niżej 6°30', dla węgla w klasie 1,0-0,1 mm oraz poniżej 6°30', dla węgla klasy 2,0-0,3 mm, wystąpiło osadzanie ziarn frakcji ciężkiej na dnie rynny, co całkowicie pogorszyło wskaźniki wzbogacania w wyniku zakłócenia warunków przepływu zawiesiny.

Otrzymane wyniki w pełni potwierdzają hipotezę Boczkowa [4], według której współczynnik tarcia ziarn wąskiej klasy ziarnowej poruszających się po tzw. własnej pościeli (co ma miejsce przy laminarnym charakterze przepływu w początkowych partiach rynny separatora) rośnie wraz ze wzrostem średniej wielkości ziarn. Dlatego też krytyczny kąt pochylenia rynny separatora, przy którym będzie odbywał się jeszcze ruch materiału, jest tym większy, im większe są ziarna wzbogacanego materiału. Próby wzbogacania przeprowadzono dla obu klas ziarnowych przy utrzymaniu wydajności separatora $Q = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ oraz $Q = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$. W obu przypadkach zwiększenia wydajności z $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ do $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$ spowodowało pogorszenie jakości otrzymywanych koncentratów. I tak przy wzbogacaniu węgla w klasie 1,0-0,1 mm zwiększenie wydajności z $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ do $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$ pociągnęło za sobą zwiększenie zawartości popiołu w koncentracie z 8,1% do 10,2% przy wychodzie koncen-

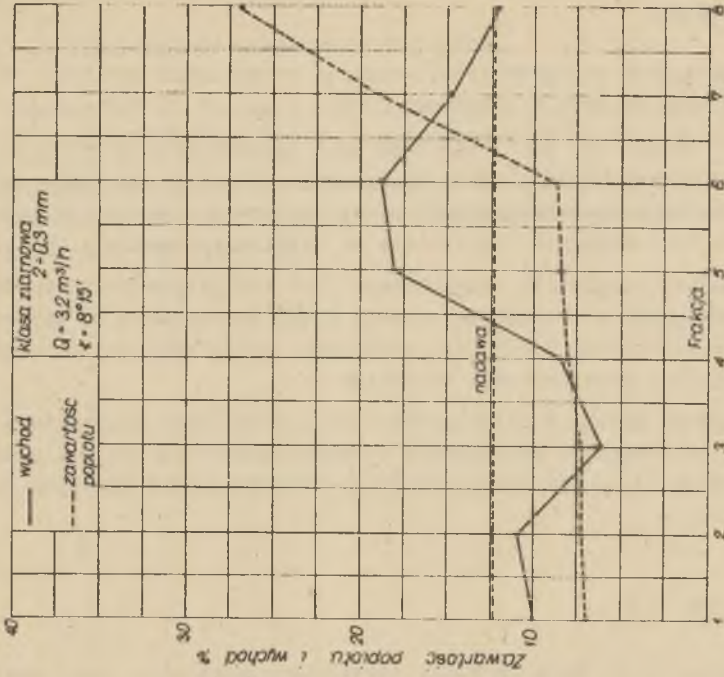
tratu $\tau_k = 70\%$. Kąt pochylenia rynny separatora w obu przypadkach równy był $11^{\circ}16'$.

Tablica 2

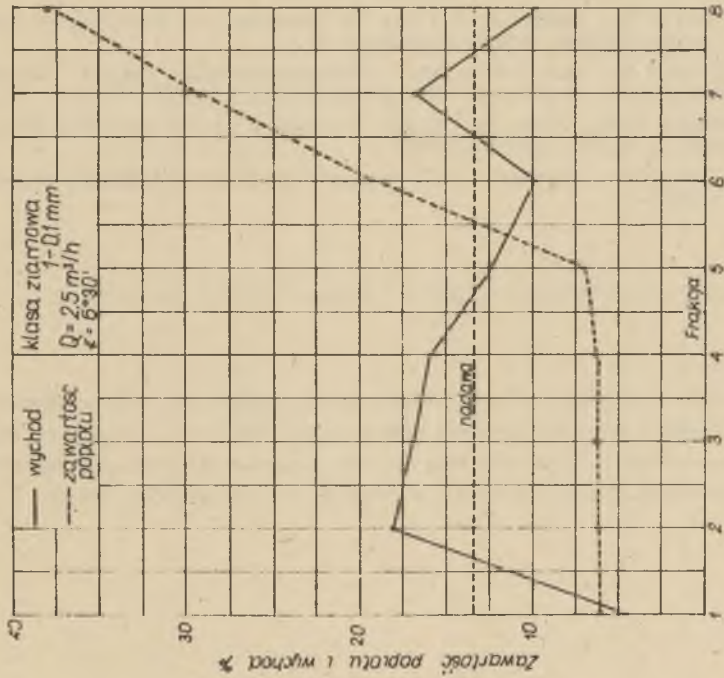
Wyniki wzbogacania mułu węglowego w klasie 2-0,3 mm obliczone na podstawie wykreślonych krzywych wzbogacania przy założeniu wychodu koncentratu $\tau_k = 70\%$

Kąt pochylenia rynny roboczej	Wydajność separatora	Zawartość popiołu w koncentracie	Zawartość popiołu w odpadach	Uzysk części palnych i lotnych w koncentracie	Uzysk popiołu w odpadach
stopień	m ³ /h	%	%	%	%
8°15'	2,5	7,3	23,3	73,8	57,8
10°	2,5	7,6	19,9	72,9	52,8
11°16'	2,5	7,7	20,7	73,1	53,5
15°10'	2,5	9,2	15,9	71,6	42,6
8°15'	3,2	7,9	21,9	73,3	54,3
10°	3,2	8,0	18,0	65,1	49,1
11°16'	3,2	8,9	17,5	72,1	45,6

Otrzymane rezultaty świadczą o konieczności zachowania warunków laminarnego przepływu w początkowych partiach rynny roboczej separatora, co uzyskać można przez zmniejszenie kąta pochylenia rynny lub poprzez zmniejszenie jego wydajności (przy zachowaniu niezmiennych pozostałych parametrów). Zmniejszenie kąta nachylenia rynny do wartości krytycznej, przy której nie wystąpi jeszcze spiętrzenie się ziarn frakcji ciężkiej na dnie rynny, prowadzić będzie w każdym przypadku do zwiększenia dokładności wzbogacania. Spadek wydajności separatora poniżej pewnej, określonej wartości spowodować musi zmniejszenie wysokości strumienia, co ujemnie wpływa na jakość otrzymanych koncentratów. Pogorszenie wyników wzbogacania przy zwiększaniu kąta pochylenia rynny separatora i jego wydajności tłumaczyć należy zwiększeniem turbulentności strumienia zawiesiny, czego efektem jest wzrost wartości pionowej składowej prędkości, co w konsekwencji prowadzi do wynoszenia najdrobniejszych ziarn frakcji ciężkiej do górnych warstw strumienia, a tym samym znacznie pogarsza wskaźniki wzbogacania.



Rys. 4. Rozkład zawartości popiołu w produktach wzbogacania



Rys. 3. Rozkład zawartości popiołu w produktach wzbogacania

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy otrzymanych wyników wzbogacania węgla w separatorach wachlarzowych oraz w oparciu o informacje i dane przytoczone z literatury sformułować możemy następujące wnioski:

1. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały istotny wpływ doboru parametrów technologicznych wzbogacania - takich jak kąt pochylenia koryta roboczego oraz wydajność separatora na rezultaty rozdziału.
2. Dokładność rozdziału uwarunkowana jest laminarnym charakterem przepływu zawiesiny w początkowej części rynn separatora, co uzyskać można przez odpowiedni dobór kąta pochylenia rynn roboczej separatora, jego wydajności oraz lepkości zawiesiny.
3. Otrzymane wyniki w pełni potwierdzają przydatność separatora wachlarzowego do wstępnego wzbogacania drobnoziarnionych węgla o dużym zanieczyszczeniu, a tym samym zachęcają do prowadzenia dalszych badań w tym zakresie.

LITERATURA

- [1] Bogatow A.D., Zubynin J.L.: Rozdelenje minerałow wowo wzwiesiesuszczich potokach małej tołszcziny. Moskwa 1973.
- [2] Helfricht R., Schubert H.: Die Facherrinn ein Dichfesortiergerat für die Anreicherung feiner Kornungen.
- [3] Helfricht R.: Ein Betrog zur Dichtesortierung feiner Kornungen in Fächerrinnen. Freiburger Forschungshefte A. 383, 1966.
- [4] Biełogaj P.D., Zadorožny W.G.: Konusnyje separatory dla obogaszczenja rozsyplej i rud. Moskwa 1968.
- [5] Bogatow A.D., Zubynin J.L.: Obogaszczenje na strujnych żelobach. Moskwa 1965.

ОБОГАЩЕНИЕ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ УГЛЕЙ В ПОТОЧНО-ВЕРНЫХ СЕПАРАТОРАХ

Р е з ю м е

В статье представлены результаты исследований над обогащением мелкозернистых углей в поточно-верном сепараторе "Спенсер". Обозначены самые благодарные условия обогащения при помощи определения соответствующего угла уклона решета сепаратора, как и степени его нагружения исходном питанием.

ENRICHMENT OF FINE COAL IN STREAM FAN SEPARATORS

S u m m a r y

The article presents investigations results on the enrichment of fine coal in the "Spencer" stream fan separator. Best enrichment conditions have been determined by the choice of optimum inclination angle of the separator chute and its feed load.