ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969
Seria: GÓRNICTWO z. 41 Nr kol. 269

Mgr inż. Mirosław Ślusarek
Instytut Metali Nieżelaznych
Gliwice

HYDROCYKLON ZAWIESINOWY W PROCESIE WSTĘPNEGO WZBOGACANIA RUD Zn-Pb

Wstęp

Zastosowanie hydrocyklonu z cieczą ciężką, jako urządzenia do wstępnego wzbogacania stanowi niewątpliwie postęp w procesie przeróbczym.

Próby przystosowania klasycznych separatorów zawiesinowych do wzbogacania ziarn drobnych mimo skomplikowanej budowy (płuczki laminarne) nie zapewniały skutecznego ich rozdziału. Przyczyną jest tu skrępowany charakter opadania ziarn spowodowany lepkością i prędkościami progowymi cieczy zawiesinowej. Zastosowanie hydrocyklonów pracujących z zawiesiną ciężką przyczyniło się do obniżenia dolnej granicy ziarnistości przerabianego materiału do 0,5 mm a nawet sporadycznie do 0,2 mm. Wspomniane obniżenie możliwe było w związku z występowaniem w hydrocyklonie siły odśroskowej i dużego gradientu prędkości, które powodowały wielokrotne zwiększenie prędkości opadania ziarn i znaczne obniżenie lepkości ośrodka.

Uzależnione jest to od charakterystyki cyklonu (głównie od wielkości kąta stożkowego i od stosunku średnic przelewu i wylewu) oraz od właściwości cieczy ciężkiej.

Wytworzony w hydrocyklonie ciężar właściwy cieczy (δ_r) może być znacznie większy od ciężaru właściwego cieczy podawanej do cyklonu (δ_n). Wartość $\delta_r - \delta_n$ waha się od 0,2 do 1,0 g/cm^3 (w naszych doświadczeniach dla warunków optymalnych wynosiła 0,385 g/cm^3). Na podstawie danych doświadczalnych badaczy radzieckich, G.P. Piterskich a i innych - dla zawie-

siny magnetytu przedstawiono wartość $\delta_r - \delta_n$ i $\frac{\delta w}{\delta p}$ dla dp = = Ø 25,5 mm dw = Ø 14,6 mm w zależności od kąta stożkowego hydrocyklonu na rys. 1.

gdzie:

δ_w – ciężar właściwy cieczy wychodzącej wylewem

δ_p – ciężar właściwy cieczy wychodzącej przelewem

dw – średnica wylewu

dp – średnica przelewu

Z rysunków wynika, że wartość $\delta_r - \delta_n$ wzrasta w hydrocyklonie ze wzrostem kąta stożkowego i wartości $\frac{dp}{dw}$.

Wg Nawrockiego stosunek prędkości opadania małych ziarn węglowych wywołanych siłą odśroskową i siłą ciężkości ($\frac{Vo}{V'o}$ gdzie: Vo – prędkość opadania wywołana siłą odśrodkową V'o – prędkość opadania wywołana siłą ciężkości) wynosi 88, tzn. że w polu działania siły odśrodkowej prędkość poruszania się tych ziarn jest większa.

Rozpatrzymy opadanie dwóch ziarn 1 i 2 pod wpływem siły ciężkości o jednakowych średnicach $d_1 = d_2$ różniących się ciężarem objętościowym (δ_1 = 2,9 g/cm^3, δ_2 = 4,0 g/cm^3 w środowiskach o ciężarze właściwym: ϑ_1 = 1,0 g/cm^3

ϑ_2 = 2,0 g/cm^3

ϑ_3 = 2,85 g/cm^3

Prędkość opadania ziarn można wyliczyć z wzoru 1:

$$u = \frac{d^2 \cdot 2g\ (\delta - \vartheta)}{9} \qquad 1)$$

gdzie:

u – prędkość ustalona opadania ziarn w cm/sek

d – średnica ziarna w cm

δ – c.wł. (objętościowy) ziarna minerału, g/cm^3

ϑ – c.wł. środowiska, g/cm^3

η – opór ośrodka

Stosunek $\frac{u_2}{u_1} = \frac{\delta_2 - \vartheta}{\delta_1 - \vartheta}$

dla $\vartheta_1 = 1$, $\frac{u_2}{u_1} = 1{,}57$

$\vartheta_2 = 2$, $\frac{u_2}{u_1} = 2{,}22$

$\vartheta_3 = 3$, $\frac{u_2}{u_1} = 23$

W przypadku rozdziału w hydrocyklonie główną siłą jest siła odśrodkowa wywołana zwirowaniem zawiesiny. Pomijając siłę ciężkości, ustaloną prędkość odśrodkową (V) można obliczyć zastępując we wzorze Stokesa przyśpieszenie ziemskie przyśpieszeniem odśrodkowym (a) czyli wzór na prędkość miałby postać:

$$V = \frac{d^2 \cdot 2a\,(\delta - \vartheta)}{9\eta} \qquad 2)\ \text{przy czym}\ a = \frac{b^2}{r_o}$$

gdzie: b - prędkość obwodowa

r_o - promień krzywizny wirowania (promień hydrocykl.)

Ostateczny wzór opadania ziarn w polu działania siły odśrodkowej będzie:

$$V = \frac{d^2\,\frac{2b^2}{r_o}\,(\delta \cdot \vartheta)}{9\eta}$$

Porównując opadanie ziarn w polu działania siły odśrodkowej i siły ciężkości otrzymamy:

$$\frac{V}{u} = \frac{b^2}{r_o \cdot g} \qquad \text{przy czym}\ b = \frac{Q}{F}$$

gdzie:

Q - nadawa objęt. do hydrocykl. cm^3/sek

$$\text{skąd}\ \frac{V}{u} = \frac{Q^2}{r_o \cdot F^2 \cdot g} \qquad 3)$$

F - powierzchnia wlotu, cm^2

Dla konkretnego przykładu gdzie:

Q = 100 l/min

F = 7,06 cm^2

r_o = 5 cm

stosunek $\frac{V}{u}$ = 11,3 czyli w badanym hydrocyklonie prędkość odśrodkowa przy wlocie do niego jakiegokolwiek ziarna jest 11 razy większa jak prędkość opadania ziarna w sep. statycz. (pod działaniem siły ciężkości), przy założeniu, że c.wł. ośrodków

są jednakowe. Należy poza tym zauważyć (na podstawie wzoru 3), że wartość $\frac{v}{u}$ zależy od wielkości hydrocyklonu i ilości nadawy.

Siłę tnącą, występującą w cieczy ciężkiej zawiesinowej można przedstawić np.:

$$T = \eta \frac{dv}{dy}$$

gdzie:

dv – różnica prędkości cieczy w 2 płaszczyznach odległych od siebie o dy

η – współczynnik proporcjonalności – lepkość dynamiczna

$$\eta = \frac{T}{\frac{dv}{dy}}$$

Z wzoru tego wynika, że lepkość η maleje ze wzrostem $\frac{dv}{dy}$; W hydrocyklonie gradient prędkości jest duży i wzrasta ze zmniejszeniem promienia.

Opisane zjawiska zachodzące w hydrocyklonie zawiesinowym stwarzają korzystne warunki dla rozdziału ziarn drobnych.

2. Dotychczasowe badania w świetle danych literaturowych

Opanowanie pod względem mechanicznym i technologicznym omawianego procesu spowodowało lawinowe powstawanie zakładów wzbogacania ziarn drobnych – szczególnie przy wzbogacaniu węgla.

Już w roku 1958 w Europie zachodniej pracowało 16 hydrocyklonowych zakładów, które przerabiały łącznie 1600 t materiału na godzinę o ziarnistości od 0,5–19 mm. Średnica hydrocyklonów wzbogacających wahała się od 350 do 630 mm, a ich wydajność odpowiednio była 25 t/godz. i 25 t/godz.

Badania Davisa, Dreissena i Olivera dały przy wzbogacaniu tą metodą bardzo dobre wyniki dla rud miedzi, chromu, żelaza, manganu a także fosforytów i żwirów. Uziarnienie nadawy wynosiło od 0,2–9,5 mm, gęstość zawiesiny od 2,5–3,4 g/cm^3. Ponadto wymienieni autorzy stwierdzili, że do sporządzania cieczy zawie-

sinowej o gęstości do 2,7 g/cm^3 można stosować - magnetyt o gęstości 2,7-3,0 g/cm^3 - mieszaninę magnetytu z żelazokrzemem powyżej 3,0 g/cm^3 - sam żelazokrzem.

Również Kanadyjczycy reprezentowani przez f-mę Cyclone Engineering Sales Ltd rozpoczęli produkcję hydrocyklonów wzbogacających rozciągając ich zastosowanie do rud Au, Ag i pirytu z węgla. W trakcie doświadczeń, jest nadanie omawianej metody dla rud żelaza Cu, U, Hg, Aby zwiększyć trwałość urządzeń do ich konstrukcji używają stali Ni-Hard.

W zakładzie w Kinshu wzbogaca się rudę zawierającą chalkopiryt 3,2%, piryt 15%, sfaleryt 0,15%, galenę 0,15%. Skałę płonną tworzą: piaskowce (50%), kwarc, kalcyt i łupki. Metodą grawitacyjną wydziela się ok. 52% skały.

Pozostały produkt klasyfikuje się na klasy -5mm, która zostaje skierowana do flotacji i 5-20 mm, którą wzbogaca się w hydrocyklonie (D = 350 mm) z cieczą zawiesinową o c. wł. 2,21 g/cm^3 otrzymaną z obciążnika żelazokrzemowego i wody. Wydajność hydrocyklonu 20-25 t/h.

Zużycie obciążnika 200 g/t. Największą trudność sprawa wykładzina części cylindrycznej hydrocyklonu, która zużywa się po 1000 h pracy. Z upływem czasu zarysował się podział hydrocyklonów wzbogacających na wysoko i niskociśnieniowe, z których na wyróżnienie zasługują te drugie z uwagi na małe zużycie wskutek ścierania urządzeń mechanicznych.

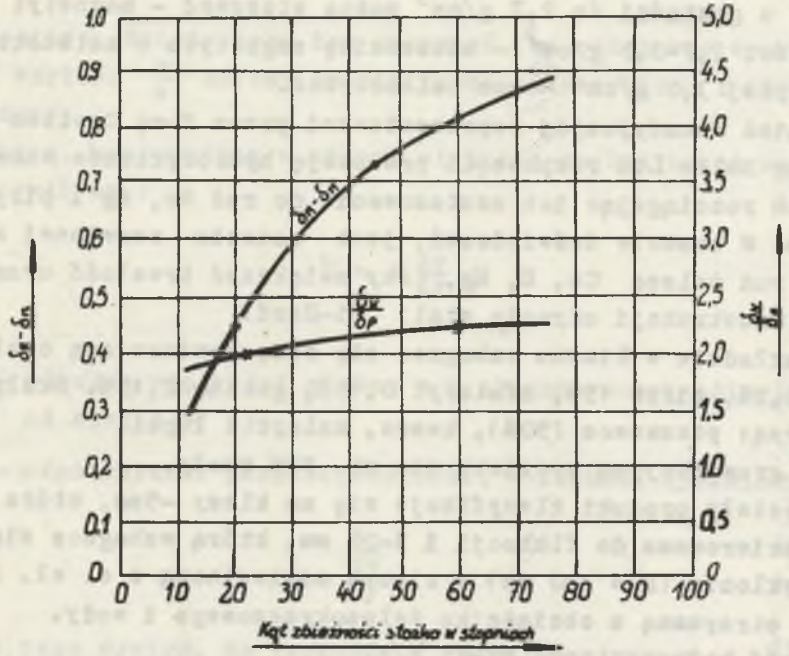
Charakterystyczne dane hydrocyklonów zawiesinowych:

- ciśnienie wlotowe cieczy - 0,3-1,0 atm
- kąt zbieżności stożka - 20-90°
- stosunek wysokości części cylindrycznej H do średnicy hydrocyklonu D wynosi 1-2
- średnica wlotu 1/4-1/6 D
- średnica przelewu 1/2-1/3 D

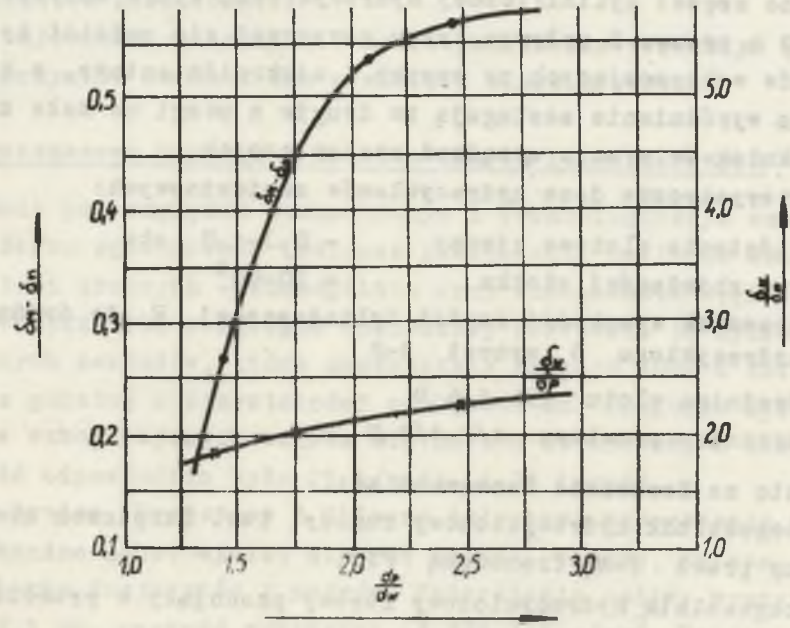
Ostatnio na Zachodzie lansowane są:

a) wzbogacalnik hydrocyklonowy rurowy tzw. Turpinson zbudowany przez f-mę francuską PIC,

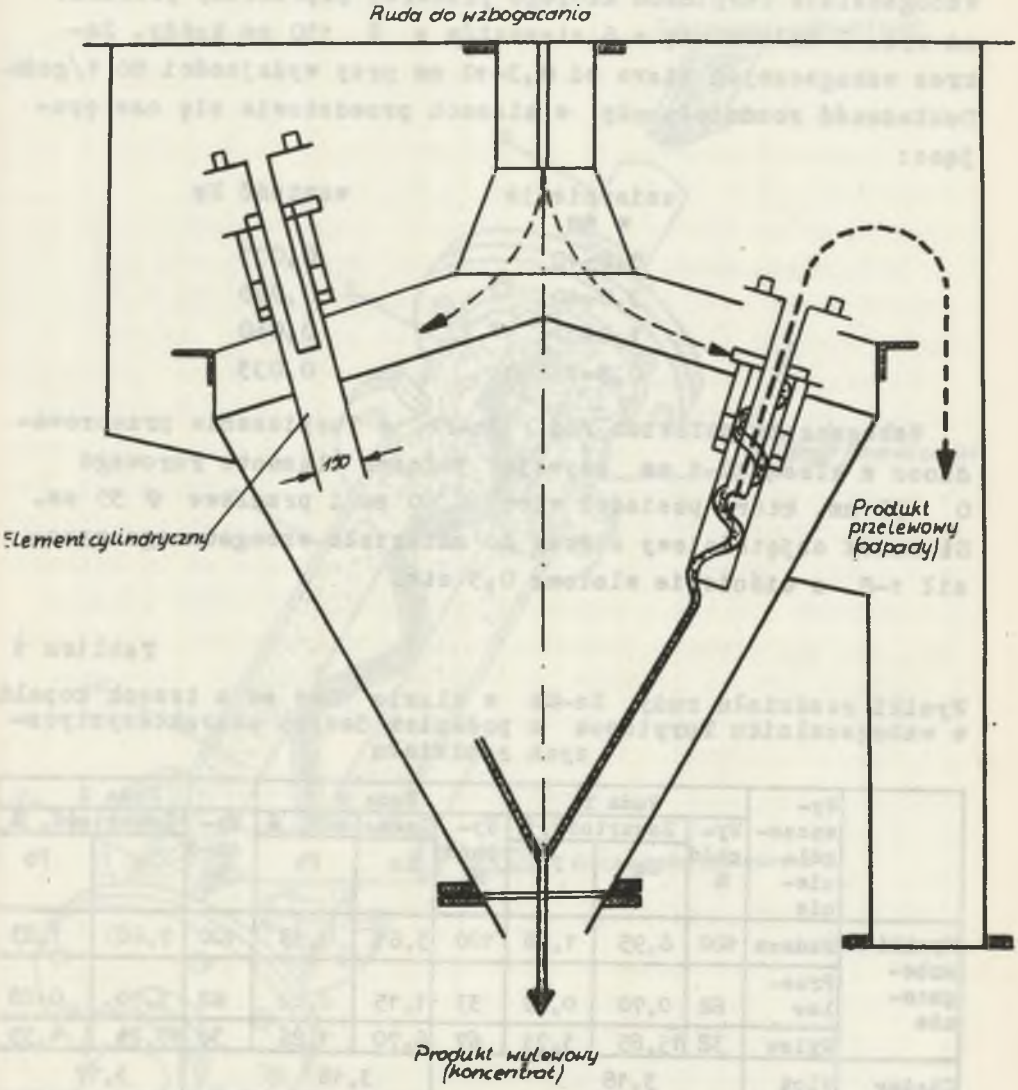
b) wzbogacalnik hydrocyklonowy rurowy pracujący w przeciw prądzie tzw. Dyna-Whirlpool.



Rys. 1. Wpływ kąta stożkowego na przyrost ciężaru właściwego cieczy w hydrocyklonie



Rys. 2. Wpływ średnic przelewu i wylewu na przyrost ciężaru właściwego cieczy w hydrocyklonie



Rys. 3. Wzbogacalnik hydrocyklonowo-rurowy Turpinson

Wzbogacalnik Turpinson którego przekrój poprzeczny pokazano na rys. 3 składa się z 6 elementów z ∅ 150 mm każdy. Zakres wzbogacanych ziarn od 0,3-10 mm przy wydajności 80 t/godz. Dokładność rozdziału Ep w klasach przedstawia się następująco:

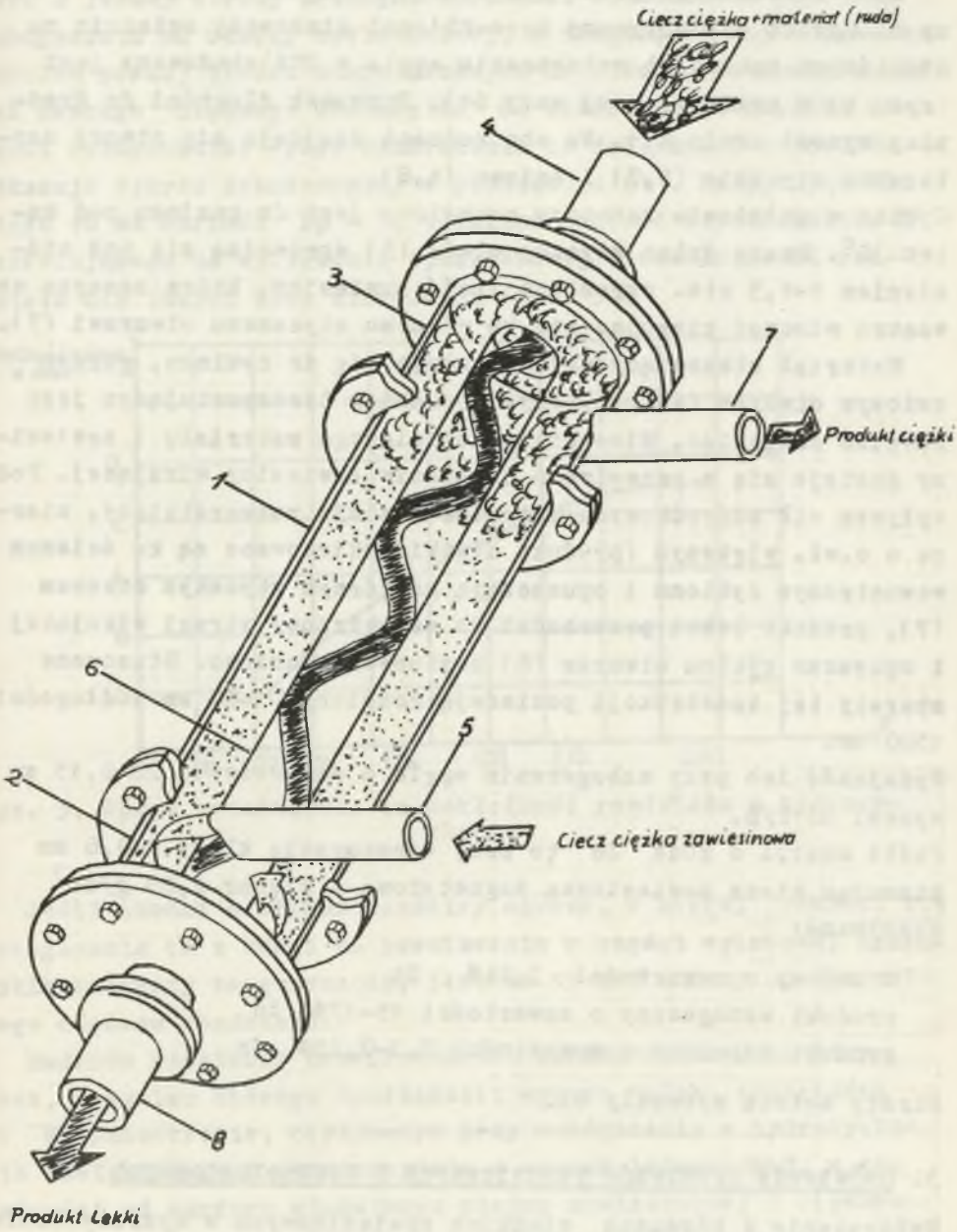
uziarnienie w mm	wartość Ep
8,0-10	0,035
3,0-10	0,035
1,0-3	0,040
0,8-1	0,035

Wzbogacanie polskich rud Zn-Pb w Turpinsonie przeprowadzono z klasą 10-1 mm używając jednego elementu rurowego 0 150 mm, który posiadał wlot ∅ 60 mm i przelewe ∅ 55 mm. Stosunek objętościowy cieczy do materiału wzbogacanego wynosił 1-8 a ciśnienie wlotowe 0,5 atm.

Tablica 1

Wyniki rozdziału rudy Zn-Pb w klasie 10-1 mm z trzech kopalń w wzbogacalniku Turpinson z podaniem danych charakterystycznych rozdziału

	Wyszczególnienie	Ruda T			Ruda B			Ruda O		
		Wychód %	Zawartość, %		Wychód %	Zawartość, %		Wychód %	Zawartość, %	
			Zn	Pb		Zn	Pb		Zn	Pb
Wyniki wzbogacania	Nadawa	100	6,95	1,68	100	5,61	0,98	100	7,60	1,83
	Przelew	62	0,70	0,02	33	1,15	0,02	62	1,50	0,08
	Wylew	38	15,85	3,71	67	6,70	1,26	38	15,24	4,59
Ciężar właść. g/cm³	Wlot	3,18			3,18			3,17		
	Przelew	3,20			2,70			2,60		
	Wylew	3,42			3,39			3,27		
Dokładność rozdziału Ep		0,06			0,05			0,045		



Rys. 4. Separator DWP

Dane charakterystyczne omawianego wzbogacania ujęto w tablicy 1. Cyklon cylindryczny Dyna-Whirpol stosowany ostatnio na niektórych zakładach wzbogacania węgla w USA zbudowany jest (rys. 4) z cylindrycznej rury (1). Stosunek długości do średnicy wynosi około 4:1. Na obu końcach znajdują się otwory usytuowane stycznie (5,7) i osiowo (4,8).
Cyklon w położeniu roboczym nachylony jest do poziomu pod kątem 30°. Przez dolny styczny otwór (5) wprowadza się pod ciśnieniem 1-1,5 atm. określoną ilość zawiesiny, która zaczyna wewnątrz wirować kierując się ku górnemu stycznemu otworowi (7).

Materiał stanowiący nadawę podaje się do cyklonu, górnym osiowym otworem (4) przy czym ośrodkiem transportującym jest również zawiesina. Mieszanina wejściowego materiału i zawiesiny dostaje się w przestrzeń działania zawiesiny wirującej. Pod wpływem sił odśrodkowych materiał zostaje rozwarstwiany, ziarna o c.wł. większym (produkt ciężki) skierowane są ku ścianom wewnętrznym cyklonu i opuszczają go górnym stycznym otworem (7), produkt lekki przechodzi do wewnętrznej strugi wirującej i opuszcza cyklon otworem (8) usytuowanym osiowo. Stosowane aparaty tej konstrukcji posiadają rozmiary 400 mm i długości 1500 mm.
Wydajność ich przy wzbogacaniu węgla o uziarnieniu 20-0,15 mm wynosi 50 t/h.
Jeśli chodzi o rudy Zn to przy wzbogacaniu klasy 8-0,6 mm stosując ciecz zawiesinową magnetytową i ciężar 2,85 g/cm^3 otrzymano:

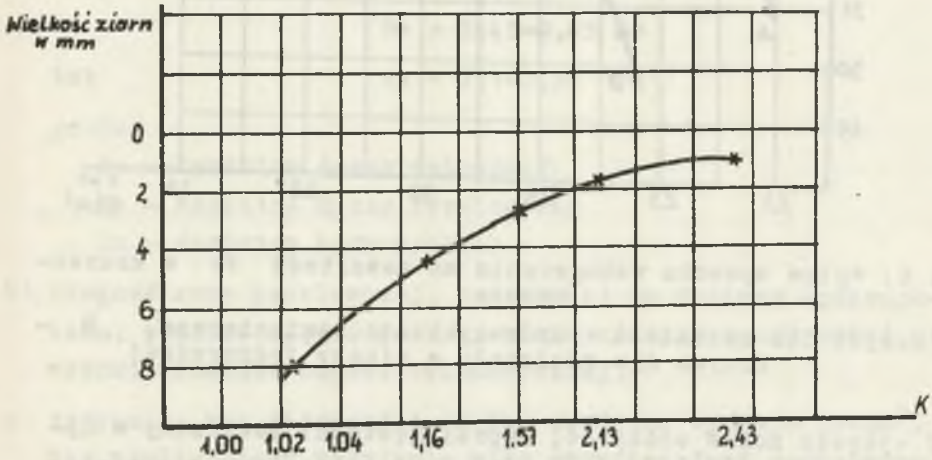
z nadawy o zawartości 3,24% Zn
produkt wzbogacany o zawartości 15-17% Zn
produkt odpadowy o zawartości 0,3-0,25% Zn

Straty metalu wynosiły 6%.

3. Omówienie problemów technicznych i technologicznych

Wzbogacanie w cieczach ciężkich zawiesinowych w hydrocyklonie obejmuje najczęściej klasy ziarnowe leżące w zakresie 10-0,5 mm. (Wyjątek stanowią udane próby na skalę przemysłową węgla i rud żelaza o uziarnieniu do 50 mm).

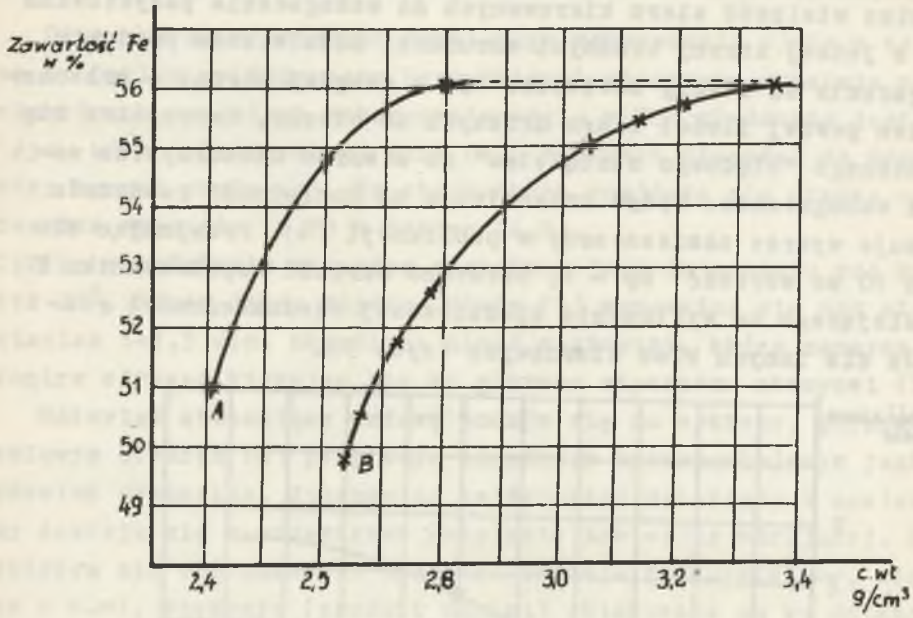
Dolna wielkość ziarn kierowanych do wzbogacania podyktowana jest z jednej strony trudnymi warunkami oddzielenia produktu wzbogacania od cieczy zawiesinowej, z drugiej strony - przechodzeniem pewnej ilości ziarn drobnych do cieczy, tworzeniem się tak zwanego "błędnego obciążnika" co stwarza niekorzystne warunki wzbogacania. Wpływ uziarnienia na dokładność rozdziału pokazuje wykres zamieszczony w publikacji (1). Przyjmując dla ziarn 10 mm wartość Ep = 1, ustalono wartość współczynnika K pozwalającego na wyliczenie spodziewanej niedokładności rozdziału dla innych klas ziarnowych (rys. 5).



Rys. 5. Wpływ uziarnienia na dokładność rozdziału w hydrocyklonie

Jeśli chodzi o ciężar właściwy cieczy, w której prowadzi się wzbogacanie to z uwagi na powstawanie w części wylotowej hydrocyklonu strefy zagęszczania, jest on 15-20% niższy od optymalnego ciężaru rozdziału.

Badacze radzieccy przeprowadzili bardzo ciekawy eksperyment, w wyniku którego sporządzili wykres wpływu zawartości Fe w koncentracie, otrzymanym przy wzbogacaniu w hydrocyklonie zawiesinowym i grawitacyjnie w cieczy jednorodnej, w zależności od ciężaru właściwego cieczy zawiesinowej i ciężaru właściwego rozdziału w próbie densymetrycznej - rys. 6.



Rys. 6. Wpływ sposobu wzbogacania na zawartość Fe w koncentracie

A - krzywa dla rozdziału w hydrocyklonie zawiesinowym, B - krzywa dla rozdziału w cieczy jednorodnej

Z wykresu można odczytać, żeprzy gęstości zawiesiny w hydrocyklonie 2,8 g/cm^3, można otrzymać koncentrat o zawartości Fe. Jakościowo taki sam koncentrat otrzymano stosując ciecz ciężką jednorodną o ciężarze właściwym 3,3 g/cm^3. Jeśli chodzi o ciśnienie wlotowe cieczy to obecnie stosuje się przy wzbogacaniu wartości niewielkie wynoszące ok. 0,5 atm., wywołane najczęściej grawitacyjnym spadem. W pewnym zakresie wzrost ciśnienia wlotowego korzystnie wpływa na efektywność rozdziału. Ciśnienie wlotowe cieczy do hydrocyklonu (opory w hydrocyklonie) jest funkcją wychodu produktów wzbogacania. Wielkość uziarnienia stosowanego obciążnika w hydrocyklonie zawiesinowym odgrywa również ważną rolę. Chodzi o to, aby nie zachodziła w nim klasyfikacja obciążnika.

Dreissen, Kleinjans proponują skład ziarnowy obciążnika:

50% ziarn - 20
2% " + 43

a uczeni radzieccy (Tomczuk i Kwaskow):

15,6% ziarn + 75
84,4% " - 75

Wymiary charakterystyczne hydrocyklonu zawiesinowego przedstawiają się następująco:

a) średnica wylewu powinna być 3-4 razy większa od średnicy maksymalnego ziarna przeznaczonego do wzbogacania. Jej zależność od średnicy dyszy przelewowej i średnicy hydrocyklonu przedstawiają poniższe wzory:

$$Dw = 0,45-0,65\ dp$$

lub

$$dw = 0,1-0,22\ Dh$$

gdzie:
dw - średnica dyszy wylewowej
dp - średnica dyszy przelewowej
Dh - średnica hydrocyklonu

b) długość rury przelewowej, wchodzącej do wnętrza hydrocyklonu, powinna sięgać poniżej wlotu cieczy, a nie niżej niż wynosi wysokość części cylindrycznej,

c) optymalny kąt zbieżności stożka powinien wynosić 20-30°. Aby wyeliminować działanie siły grawitacyjnej nachylenie do poziomu osi hydrocyklonu powinno wynosić 15-20°,

d) wagowy stosunek fazy stałej R (rudy) do fazy płynnej C (cieczy zawiesinowej) powinien wynosić:

$$R:C = 1:5 \div 1:8.$$

Ważnym parametrem przy wzbogacaniu w hydrocyklonie zawiesinowym jest też wartość różnicy Δ między ciężarem właściwym cieczy wlotowej i przelewowej, która dla optymalnego rozdziału nie powinna być zbyt duża.

4. Badania własne

Przedmiotem badań były dwie rudy Zn-Pb pochodzące z niecki bytomskiej i niecki chrzanowskiej, celem ustalenia technologii wzbogacania w hydrocyklonie zawiesinowym.
Ruda z niecki bytomskiej stanowiła mieszaninę urobku z caliżny i robót wtórnych zawierającą:

6,54% Zn
0,54% ZnO
0,81% Pb
0,35% PbO
5,92% Fe

Przeprowadzono ponadto porównanie wskaźników technologiczno-ekonomicznych dwóch wariantów wzbogacania a mianowicie:

Wariant A - polegający na rozdziale w cieczach ciężkich zawiesinowych klasy 60-10 mm. Frakcja tonąca z wymienionego wzbogacania po rozdrobnieniu do -10 mm i połączeniu z niewzbogacaną klasą -10 mm stanowić miała nadawę (po odmuleniu i odsianiu 1-0mm) na hydrocyklon zawiesinowy.

Wariant B - polegający na rozdrobnieniu stadialnym całości rudy poniżej 10 mm, a następnie po odmuleniu i odsianiu klasy 1-0 mm materiał ten skierować do wzbogacania w hydrocyklonie zawiesinowym.

Rudę z niecki chrzanowskiej stanowiły dwie próby:

próba 1 - była klasą 14-1 mm pochodzącą z odsiania rudy surowej. Aktualnie nie podlega ona wstępnemu wzbogacaniu, łączy się ją z rozdrobnionym produktem z separatora typu Drevboy i kieruje do mielenia i flotacji.
Wymieniona klasa, która ilościowo wynosiła 30% ogólnego wsadu zawierała:

5,16% Zn
0,54% Pb

próba 2 - była mieszaniną odsianej klasy z rudy surowej 14-1 mm i rozdrobnionego produktu tonącego z separatora Drevboy. Wymieniona mieszanina ilościowo wynosiła 60% ogólnego wsadu i zawierała:

5,66% Zn
0,60% Pb

Próby wzbogacania przeprowadzono w hydrocyklonach zaprojektowanych i wykonanych w Instytucie.
Charakteryzowały się one następującymi wymiarami:

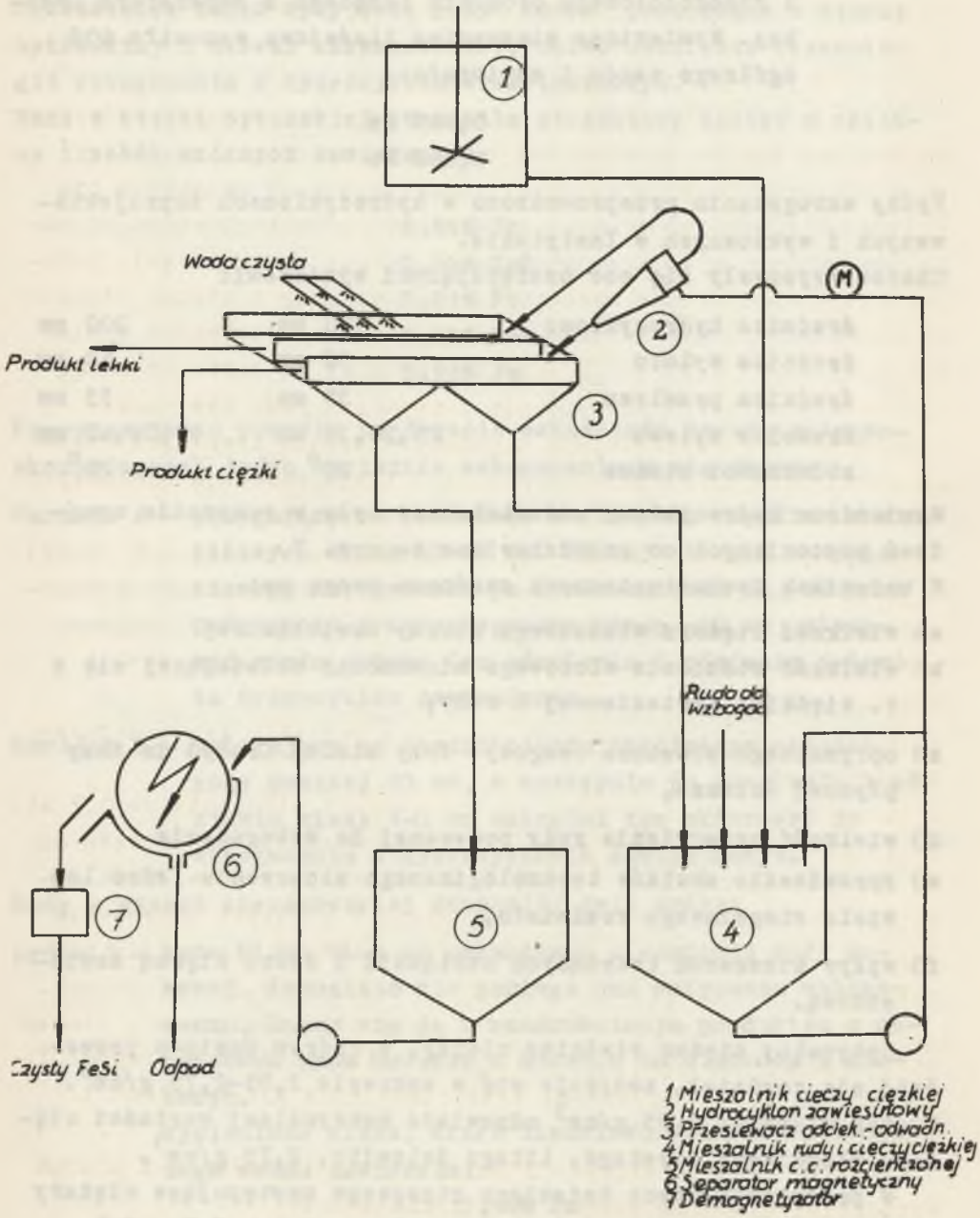
średnica hydrocyklonu	100 mm	200 mm
średnica wylotu	30 mm	40 mm
średnica przelewu	35 mm	55 mm
średnica wylewu	25,30,35 mm	30,35,40 mm
zbieżności stożka	20°	20°

Wymienione hydrocyklony zainstalowane były w schemacie urządzeń pomocniczych co przedstawiono na rys. 7.
W badaniach technologicznych zwrócono uwagę na:

a) wielkość ciężaru właściwego cieczy zawiesinowej
b) wielkość ciśnienia wlotowego mieszaniny składającej się z c. ciężkiej zawiesinowej i rudy,
c) optymalnego stosunku (wagowy) fazy stałej (rudy) do fazy płynnej (ciecz),
d) wielkość uziarnienia rudy podawanej do wzbogacania
e) sprawdzenie skutków technologicznego stosowania jedno lub wielo stopniowego rozdziału,
f) wpływ mieszanek tworzących obciążnik i ciecz ciężką zawiesinową.

Optymalny ciężar właściwy cieczy, w którym powinno prowadzić się rozdział, znajduje się w zakresie 2,95-2,75 g/cm^3. Ciężar właściwy 2,95 g/cm^3 odpowiada maksymalnej wartości ciężaru właściwego czystego, litego dolomitu, 2,75 g/cm^3.

W przeprowadzonych badaniach stosowano następujące ciężary właściwe cieczy wlotowej do hydrocyklonu: 2,4, 2,5, 2,6, 2,7 g/cm^3, które po uwzględnieniu w nim przyrostu ciężaru



Rys. 7. Schemat wzbogacania w hydrocyklonie zawiesinowym

właściwego, objęły wymieniony zakres rozdziału. Wiadomo bowiem - że wskutek powstawania w części wylotowej hydrocyklonu strefy zagęszczania, ciężar właściwy cieczy jest o 15-20% niższy od optymalnego ciężaru rozdziału.

Z wielkością ciśnienia wlotowego wiąże się sposób podawania mieszaniny zawiesiny ciężkiej i rudy do hydrocyklonu, który może być grawitacyjny lub przy pomocy pompy. W związku z tym wyłonił się problem zależności wyników technologicznych od siły odśrodkowej i ciężaru właściwego cieczy zawiesinowej. Badając wpływ ciśnienia wlotowego mieszaniny rudy i cieczy ciężkiej do hydrocyklonu zawiesinowego stosowano trzy wielkości a mianowicie: 0,2, 0,3 i 0,5 atm. Wartości te są łatwo do osiągnięcia w grawitacyjnym sposobie podawania. Poza tym niskie ciśnienia są korzystniejsze z punktu widzenia trwałości części konstrukcyjnych (mniejsze tarcie) i nie powodują niekorzystnej klasyfikacji obciążnika tworzącego zawiesinę.

Przy ustalaniu prawidłowego stosunku fazy stałej - R (rudy) do fazy płynnej - C (ciecz zawiesinowa) przeprowadzono technologiczny rozdział stosując: R:C - 1:10, 1:7, 1:5. Najkorzystniejsze wyniki otrzymano przy R:C wynoszącym 1:10 i wielkość tą przyjęto jako optymalną.

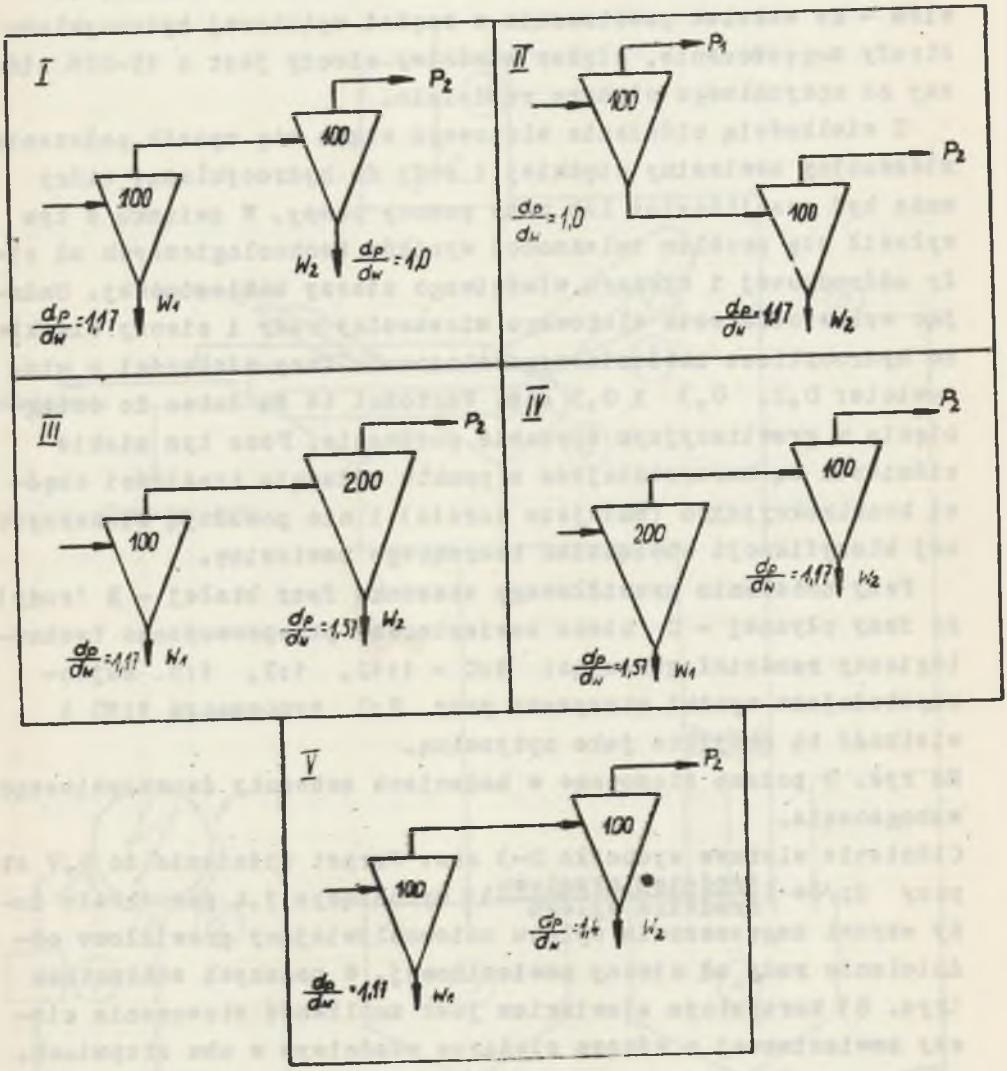
Na rys. 8 podano stosowane w badaniach schematy dwustopniowego wzbogacania.

Ciśnienie wlotowe wynosiło 0-3 atm. Wzrost ciśnienia do 0,7 atm przy dp/dw ($\frac{\text{średnica przelewu}}{\text{średnica wylewu}}$) wynoszącym 1,4 powodowało duży wzrost zagęszczania wylewu uniemożliwiający prawidłowe oddzielenie rudy od cieczy zawiesinowej. W podanych schematach (rys. 8) korzystnym zjawiskiem jest możliwość stosowania cieczy zawiesinowej o różnym ciężarze właściwym w obu stopniach.

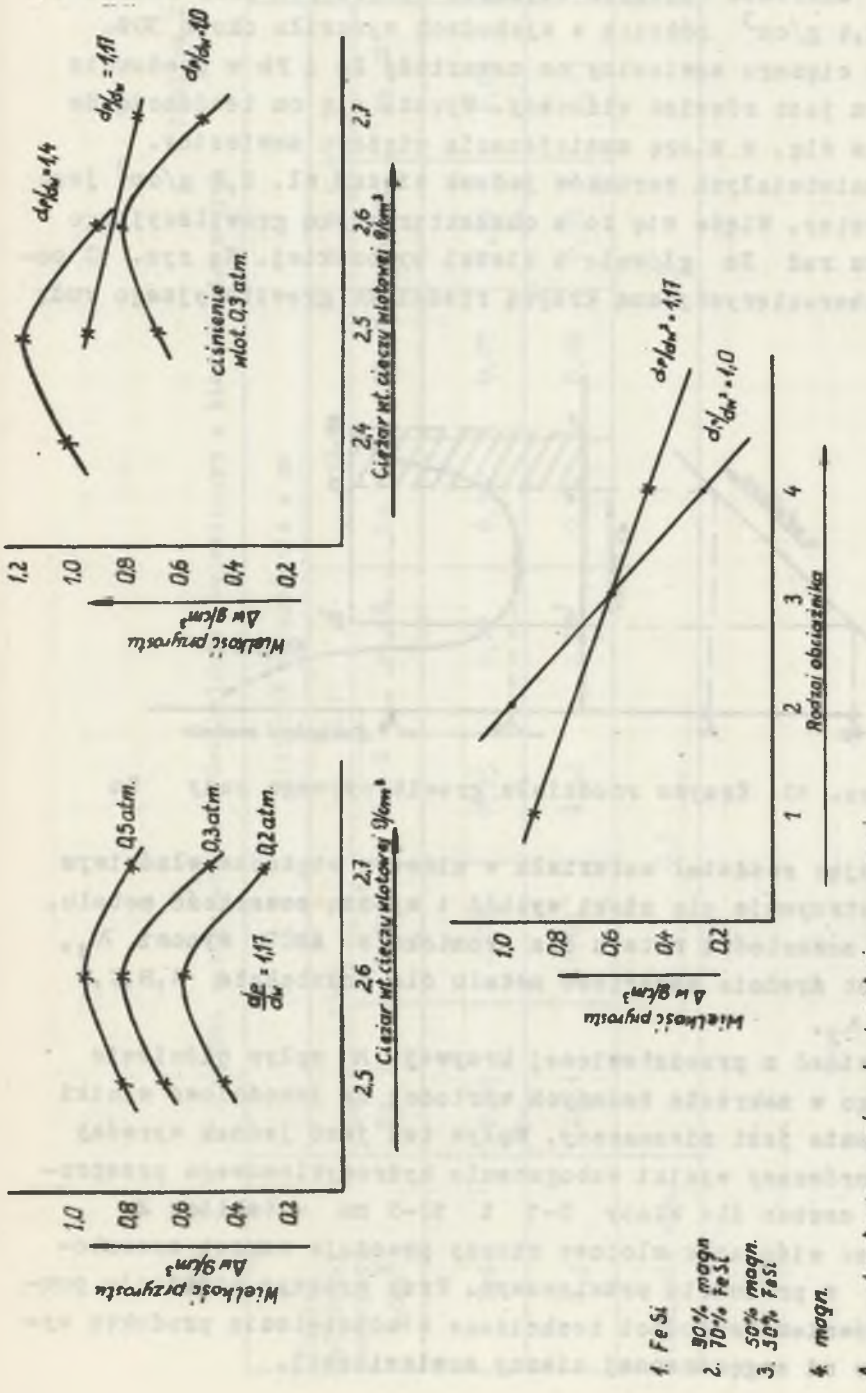
Na rys. 9 zestawiono wielkości przyrostu ciężaru wł. cieczy zawiesinowej wypływającej wylewem w zależności od własności fizycznych cieczy, parametrów konstrukcyjnych hydrocyklonu i ciśnienia wlotowego.

Analiza wyników wstępnych badań z rudą pochodzącą z niecki bytomskiej nasunęła szereg uwag a mianowicie:

Wartość ciężaru właściwego cieczy zawiesinowej wlotowej ma wyraźny wpływ na wychód produktu przelewowego stanowiącego



Rys. 8. Układy dwustopniowego wzbogacania w hydrocyklonie zawiesinowym

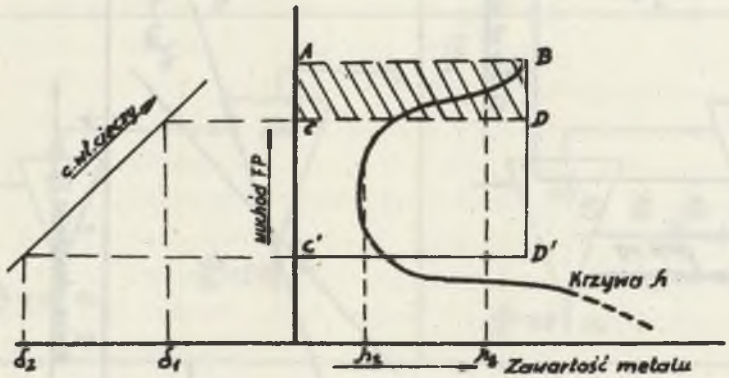


Rys. 9. Wielkość przyrostu ciężaru właściwego cieczy zawiesinowej (wylewu) w zależności od własności fizycznych cieczy, parametrów konstrukcyjnych hydrocyklonu i ciśnienia wlotowego

odpad. W zakresie badanych ciężarów właściwych przy rozdziale 2,6-2,4 g/cm^3 różnica w wychodach wynosiła około 30%.

Wpływ ciężaru zawiesiny na zawartość Zn i Pb w produkcie odpadowym jest również widoczny. Wyraża się on tendencją do obniżania się, w miarę zmniejszania ciężaru zawiesiny.

Dla zaistniałych warunków jednak ciężar wł. 2,4 g/cm^3 jest niekorzystny. Wiąże się to z charakterystyką grawitacyjnego rozdziału rud Zn głównie z niecki bytomskiej. Na rys. 10 pokazano charakterystyczną krzywą rozdziału grawitacyjnego rudy Zn.



Rys. 10. Krzywa rozdziału grawitacyjnego rudy Zn

Stosując rozdział materiału w niższym ciężarze właściwym cieczy otrzymuje się niski wychód i wyższą zawartość metalu. Średnia zawartości metalu dla prostokąta ABCD wynosi λ_1, natomiast średnia zawartość metalu dla prostokąta A,B,C,D wynosi λ_2.

Jak widać z przedstawionej krzywej λ wpływ ciśnienia wlotowego w zakresie badanych wartości na jakościowe wyniki wzbogacania jest nieznaczny. Wpływ ten jest jednak wyraźny kiedy porównamy wyniki wzbogacania hydrocyklonowego przeprowadzono osobno dla klasy 5-1 i 10-5 mm - tablica 2.

Wyższe ciśnienie wlotowe cieczy powoduje wzrost zawartości Zn w produkcie przelewowym. Przy wyższym ciśnieniu powstają również trudności techniczne w oddzielaniu produktu wylewowego od zagęszczonej cieczy zawiesinowej.

Tablica 2

Wyniki wzbogacania w hydrocyklonie zawiesinowym w klasach ziarnowych

Ciężar właściwy wzbogac. g/cm^3	Wielkość uziarnienia w mm							
	10-5		5-1		10-5		5-1	
	Zn, %	Pb, %	Zn, %	Pb, %	Zn, %	Pb, %	Zn, %	Pb, %
2,6	0,84	0,05	0,95	0,07	0,95	0,07	1,35	0,05
2,5	0,51	0,06	0,62	0,07	0,72	0,06	0,98	0,11
Ciśnienie atm.	0,3				0,5			

Reasumując powyższe spostrzeżenia, analizując wyniki technologiczne i biorąc pod uwagę możliwość zastosowania w przyszłości taniego obciążnika np. magnetytu, wzbogacanie w hydrocyklonie zawiesinowym dla badanej rudy należałoby przeprowadzić w warunkach optymalnych tzn. przy zastosowaniu następujących parametrów:

ciężar właściwy zawiesiny - 2,5 g/cm^3
ciśnienie wlotowe - 0,3 atm
wzbogacanie w jednej klasie 10-1 mm, rozdział dwustopniowy.

Wyniki prób przeprowadzonych w warunkach optymalnych zamieszczono w tablicy 3.

Produkty wzbogacania rozdzielano następnie w cieczy ciężkiej jednorodnej w zakresie ciężarów właściwych od 2,7 do 2,9 g/cm^3 (tablica 4) i określono z wykresów rys. 11, 12 wartość rozproszenia prawdopodobnego ep oraz ciężar właściwy rozdziału δ_p.

Analiza wstępnych badań dla rudy z niecki chrzanowskiej przedstawia się następująco:

Aktualny wychód klasy 14-1 mm jak wynika z 2-letniej obserwacji waha się w szerokim zakresie, wynosi 25-43%. Ilość metalu zawartego w tej klasie kształtuje się w granicach 40-47% dla Zn i 28-57% dla Pb w stosunku do metali zawartych w rudzie surowej. Omawiana klasa jest dobrze wzbogacalna grawitacyjnie. Wyniki rozdziału w cieczach ciężkich jednorodnych informują o możliwości odrzucenia 77-85% odpadów zawierających 0,55-0,84% Zn i 0,08% Pb. Produkt wzbogacony zawierał 23-34% Zn, 2,3-3,5% Pb.

Próby technologiczne wykonane w zakresie wstępnych badań w układzie jedno i dwu stopniowym w hydrocyklonie 100 i 200 mm z cieczą ciężką zawiesinową otrzymaną z różnych mieszanek żelazokrzemu i magnetytu jak również samego magnetytu potwierdziły rezultaty z cieczy jednorodnych. Najlepsze wyniki otrzymano stosując w I etapie hydrocyklon Ø 200 mm, w drugim etapie, tzw. czyszczącym lub kontrolnym, korzystniej jest stosować hydrocyklon o mniejszej średnicy - 100 mm.

Tablica 3/

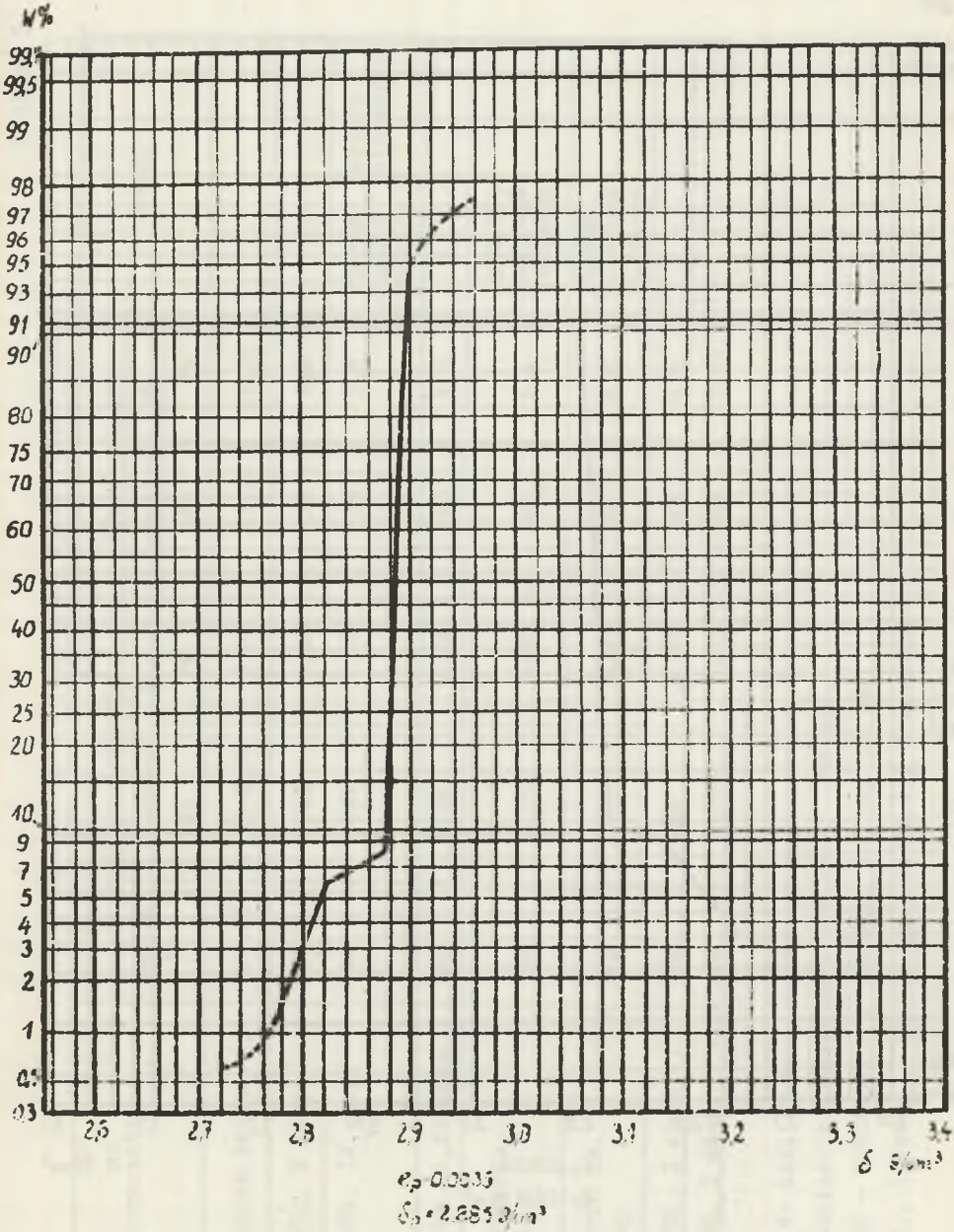
Wyniki wzbogacania w hydrocyklonie zawiesinowym w warunkach optymalnych wg wariantu A i B

Rodzaj próby	Nazwa produktów	Wychód %	Zawartość. %					Uzysk-Straty. %	
			Zn	ZnO	Pb	PbO	Fe	Zn	Pb
Wariant A	Przelew I	40.75	0.75	0.30	0.05	0.05	4,54	3.9	1,8
	Przelew II	30.56	0.68	0.15	0.05	0,03	4.70	2.7	1,3
	Przelew I+II	71.31	0.70	-	0.05	-	-	6.6	3,1
	Wylew	28.69	25,40	0.92	3,88	0.04	18.17	93.4	96.9
	Suma	100,00	7,80	-	1,15	-	-	100,0	100,0
Wariant B	Przelew I	48,13	0.75	0.27	0.07	0.04	3,64	6.9	6.5
	Przelew II	39,00	0.76	0.27	0.04	0.03	4,03	5.7	3.5
	Przelew I+II	86,1	0,76	-	0,06	-	-	12,6	10,0
	Wylew	13,9	32,82	-	3.37	-	16.30	87.4	90.0
	Suma	100,0	5,22	-	0,52	-	-	100,0	100,0

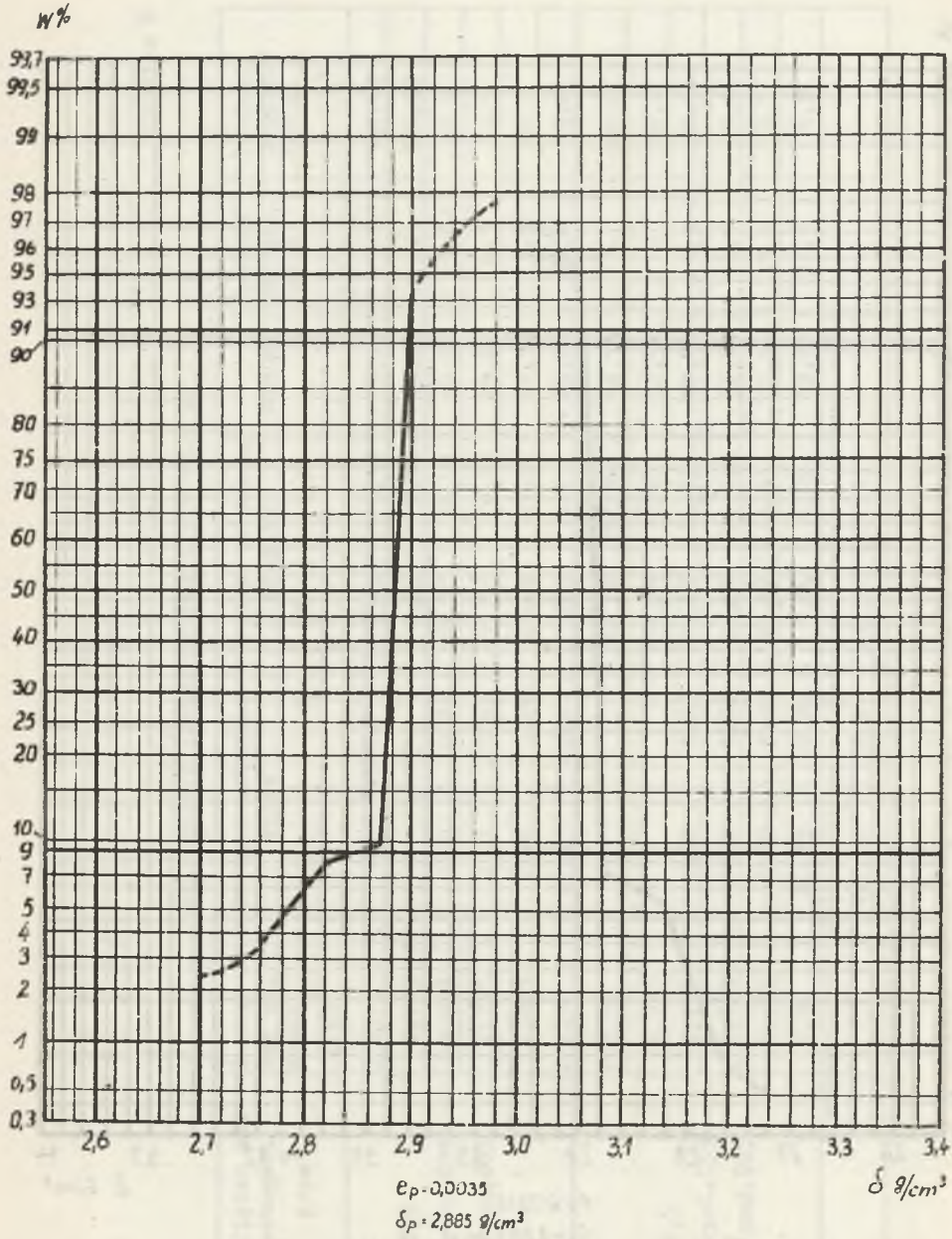
Tablica 4

Rozproszenie prawdopodobne klasy 10-1 mm

Rodzaj warianc.	Ciężar wł. wzbogac. g/cm³	Średni ciężar wł. rozdz. g/cm³	Produkt wzbogac. wylew		Produkt odpadowy przelew		a+b %	Produkt wzbogac. "w" %	Produkt odpadowy "p" %
			%	a %	%	b %			
Wariancja A	2,5 ep=0,035 δp=2,885	P 2,70	-	-	7,22	5,15	5,15	-	100,00
		2,725	-	-	5,25	3,25	3,74	-	100,00
		2,775	0,90	0,26	23,85	17,01	17,27	1,3	98,7
		2,825	5,01	1,44	31,95	22,78	24,22	6,1	93,9
		2,875	6,16	1,76	29,76	21,22	22,98	7,5	92,5
		T 2,90	87,93	25,23	1,97	1,41	26,64	94,8	5,2
Wariancja B	2,5 ep=0,035 δp=2,885	P 2,70			18,58	16,19	16,19	-	100,0
		2,725			14,24	12,41	12,41	-	100,0
		2,775	2,00	0,66	19,20	16,73	17,49	4,3	95,7
		2,825	8,11	1,86	24,30	21,17	23,03	8,1	91,9
		2,875	8,70	1,99	21,98	19,15	21,14	9,3	90,7
		2,90	80,29	18,36	1,70	1,48	19,84	93,1	6,9
			100,00	22,87	100,00	87,13			



Rys. 11. Krzywa rozproszenia prawdopodobnego próba 1



Rys. 12. Krzywa rozproszenia prawdopodobnego próba B

Tablica 5

Zestawienie wyników badań (najlepsze wyniki każdej serii)

Warunki wzbogacania	Produkt odpadowy			Prod. wzbogac.		Uwagi
	Wychód %	Zawartość, %		Zawartość, %		
		Zn	Pb	Zn	Pb	
Rozdz. w c.ciężk.jednor.	77,86	0,55-0,84	0,08	23,34	23,35	
70/30 H-100/Uk. I stop.	76	0,83	0,02	18	1,6	
70/30 H-100/Uk. II stop.	64	0,91	0,06	39	3,8	Pp-26% (wychód Zn-2,6 półproduktu) Pb-0,07
70/30 H-200/Uk. I,II stop.	85	0,86	0,06	30	3,0	
70/30 H-200/100/Uk. II stop.	82	0,79	0,06	29	2,4	Pp-2,1% Zn-5,43% Pb-0,19%
50/50 H-200/100 Uk. II stop.	65	0,79	0,07	28	2,8	Pp-20% Zn-1,41% Pb-0,05%
50/50 H-100/Uk. I stop.	66	0,9	0,07	19	1,7	
Mag. H-100/Uk. I stop.	69	0,74	0,07	15	1,35	

Wyjaśnienie do tablicy 5

70/30 - obciążnik o zawartości 70% FeSi, 30% mag.

H-100, 200 - hydrocyklon o średnicy 100 lub 200 mm

Uk I stop., II stop. - wzbogacanie jedno lub dwu stopniowe.

Obciążnikiem do wytwarzania zawiesiny powinna być mieszanina żelazokrzemu i magnetytu. Ilość magnetytu winna wynosić 30-50%. Wzrost zawartości magnetytu w obciążniku lub stosowanie samego magnetytu zmniejsza wychód odpadów i stopień wzbogacania produktu wylewowego.

Rozdział w warunkach optymalnych wykonano dla 2 prób 1 i 2, których charakterystykę podano uprzednio. Charakterystyczne dane technologiczne wzbogacania w warunkach optymalnych podano w tablica 6.

Tablica 6

Charakterystyczne dane technologiczne wzbogacania w warunkach optymalnych

Stopień wzbogac.	Średnica dysz wylewowych mm	Ciśnienie wlotowe atm.	Ciężar. właść. cieczy g/cm^3			Lepkość w ^oE
			Wlot	Przelew	Wylew	
I H-200 mm	35	0,3-0,32	2,61	2,10	3,51	1,15-1,20
II H-100 mm	30	0,34-0,36	2,61	1,96	3,70	

Wyniki wzbogacania w warunkach optymalnych przedstawiono w tablicy nr 7.

W celu zbadania procentowego rozkładu strat metalu w produkcie odpadowym - przelew (P_2) w zależności od uziarnienia wykonano analizę sitową i chemiczną - tablica 8.

Produkty wzbogacania tj. W_1, W_2 i P_2 rozfrakcjonowano w cieczy ciężkiej jednorodnej, wyliczając na tej podstawie wielkości analityczne potrzebne do wykreślenia krzywych rozproszenia prawdopodobnego tablica 9.

Rezultaty omawianych badań potwierdzają słuszność wyboru schematu i przyjętych parametrów technologicznych.

Tablica 7

Rezultaty wzbogacania w optymalnych warunkach

Rodzaj próby	Nazwa produktów	Wychód %	Zawartość, %		Rozdział, %	
			Zn	Pb	Zn	Pb
1	Przelew 2	71,68	0,76	0,06	10,55	8,00
	Wylew 2	12,57	1,64	0,16	3,99	3,70
	Wylew 1	15,75	28,06	3,02	85,46	88,30
	Suma	100,00	5,16	0,54	100,00	100,00
2	Przelew 1	74,03	0,87	0,07	87,2	8,70
	Wylew 2	6,93	1,74	0,06	4,78	6,80
	Wylew 1	21,05	23,21	2,39	86,50	84,50
	Suma	100,00	5,66	0,60	100,00	100,00

Tablica 8

Wyniki analizy sitowej i chemicznej produktu przelewowego

Rodzaj próby	Wielkość ziarn	Wychód %	Zawartość, %		Rozdział, %	
			Zn	Pb	Zn	Pb
1) Przelew 2	+ 5	80,31	0,74	0,06	79,95	77,99
	+ 3	13,99	0,74	0,07	13,92	15,86
	+ 2	4,66	0,77	0,07	4,83	5,34
	- 2	1,04	0,92	0,05	1,30	0,81
	Suma	100,00	0,74	0,06	100,00	100,00
2) Przelew 2	+ 5	59,25	0,75	0,06	61,44	49,72
	+ 3	31,00	0,62	0,09	26,57	38,97
	+ 2	8,66	0,80	0,07	9,58	18,52
	- 2	1,09	1,60	0,18	2,41	2,79
	Suma	100,0	0,72	0,07	100,00	100,00

Tablica 9

Dane analityczne dla wyliczenia rozproszenia prawdopodobnego

Nr prób	Rodzaj układu	Cięż. wł. rozdz. g/cm^3	Sredni cięż.wł. rozdz. g/cm^3	Produkt wzbogac. wylew		Produkt odpadowy przelew		a+b %	Produkt wzbogac. W %	Produkt odpad. P %
				Wychód	a %	Wychód	b %			
I	$W_1 + W_2$ P_2 ep=0,095 =2,88 g/cm^3	P 2,75	2,700	14,0	4,0	52,1	37,3	41,3	9.5	90.5
		2,75-2,80	2,775	15,8	4,5	26,1	18,8	23,3	19,3	80,7
		2,80-2,85	2,825	24,1	6,8	19,2	13,8	20,6	32.9	67,1
		2,85-2,93	2,890	8,9	2,5	8.6	1.8	4,3	58,2	41,8
		T 2,93	3,280	37,2	10,5	-	-	10.5	100,0	0.0
				100,0	28,3		71,7			
II	W_1 W_1+P_2 ep=0,10 =2,88 g/cm^3	P 2.75	2,700	7,3	1,2	43.4	36,5	37,7	3,1	96,9
		2.75-2,80	2,775	8,0	1,3	24,2	20,4	21,7	6,0	94,0
		2,80-2,85	2,825	11.0	1,7	20,9	17,6	19.3	8,7	91,3
		2,85-2,93	2,890	9,5	1.5	11.5	9,7	11,2	13.5	86,5
		T 2,93	3,465	64,2	10,1	-	-	10.1	100,0	0,0
					15.8		84,2			

5. Omówienie wyników badań

Przy stałym ubożeniu rud Zn-Pb problem wstępnego wzbogacania zaczął nabierać coraz większego znaczenia.
Metoda rozdziału rud w hydrocyklonie zawiesinowym jest nowym sposobem wzbogacania.

Oprócz obniżenia dolnej granicy ziarnistości do 1 mm a nawet do 0,5 lub 0,2 mm umożliwia ona stosowanie przy ubogich drobnoziarnistych rudach wzbogacania kolektywnego, pozwalającego na wydzielenie w I etapie możliwie największej ilości gotowych odpadów a w procesie zasadniczym, dającym koncentraty kwalifikowane, operować jak najmniejszą masą materiału o dużej koncentracji minerałów użytecznych. Zaznaczyć należy, że przy tym sposobie wzbogacania uzyskano w produkcie wylewowym koncentracje minerałów metalonośnych wynoszącą 70-80%.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń potwierdza się celowość zastosowania cieczy ciężkich zawiesinowych do wzbogacania wstępnego badanych rud poniżej 10 mm i wzbogacaniu ich w hydrocyklonie zawiesinowym po uprzednim odsianiu klasy 1-0 mm, co zapewnia następujące efekty:

- niższe straty cynku i ołowiu w odpadach wstępnego wzbogacania,
- wyższą wartość sprzedażną odpadów wstępnego wzbogacania, które mogą pokryć koszty całej przeróbki,
- wyższą wartość koncentratów blendowych
- niższe koszty inwestycyjne.

Uwagi końcowe dotyczące rezultatów badań wzbogacania rudy z niecki bytomskiej:
Z dwóch rozpatrywanych - układów wzbogacania korzystniejszym pod względem technologicznym i ekonomicznym jest sposób polegający na rozdrobnieniu całości rudy poniżej 10 mm i wzbogacaniu jej w hydrocyklonie zawiesinowym po uprzednim odsianiu klasy 1-0 mm.
Wprowadzenie wzbogacania wstępnego dla skruszonej poniżej 10 mm rudy w hydrocyklonach zawiesinowych zapewnia następujące efekty:

a) niższe straty Zn i Pb w odpadach wstępnego wzbogacania w odniesieniu do stanu obecnego o 3,14% Zn i 0-65% Pb,

w odniesieniu do schematu projektowanego - (wzbogacanie tylko klasy 60-10 mm w c.c) o 3,4% w Zn i 5-50% w Pb,

b) wyższą wartość koncentratów blendowych

c) niższe koszty inwestycyjne.

Uwagi końcowe dotyczące rezultatów badań wzbogacania rudy z niecki chrzanowskiej.

Stwierdzono możliwość wzbogacania klas drobnych w hydrocyklonach zawiesinowych. Z nadawy, którą stanowiła klasa 1-14 mm, zawierająca 5,16% Zn 0,54% Pb otrzymano:

- odpady o wychodzie 24,4% zawierające 0,76% Zn i 0,06% Pb
- półprodukt o wychodzie 4,3% zawierający 1,64% Zn i 0,16% Pb
- koncentrat o wychodzie 5,3% zawierający 28,06% Zn i 3,0% Pb

z nadawy, którą stanowiła klasa 1-14 mm i rozdrobniony produkt tonący z Drevboya, zawierająca 5,66% Zn i 0.60% Pb otrzymano:

- odpady o wychodzie 43,6% zawierające 0,87% Zn i 0,07% Pb
- półprodukt o wychodzie 4,1% zawierający 1,74% Zn i 0,06% Pb
- koncentrat o wychodzie 12,4% zawierający 23,21% Zn i 2,39% Pb.

Wstępna ocena ekonomiczna wykazała następujące roczne efekty oraz efektywność ekonomiczną wyrażoną w postaci okresu zwrotu nakładów:

Wariant I (wzbogacanie próby 1) - 7,120 mil.zł. - 0,5 roku.

Wariant II (wzbogacanie próby 2) - 18,430 mil. zł. - 0,3 roku.