GÓRNICTWO z. 43

P.3351/70

ZYGFRYD NOWAK

KLASYFIKACJA HYDRAULICZNA W OBIEGU WODNO-MUŁOWYM I TECHNOLOGICZNE KRYTERIUM JEJ STOSOWANIA

25-LECIE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYT NAUKOWY Nr 288 – GLIWICE 1970

SPIS TREŚCI

Wstęp 3
1. Określenie miejsca i roli klasyfikacji hydraulicznej w obiegu wodno-mułowym zakładu przeróbki mechanicznej węgla . . 5
1. 1. Określenie obiegu wodno-mułowego zakładu przeróbczego . 5
1. 2. Klasyfikacja hydrauliczna w obiegu wodno-mułowym . . 9
2. Zakres i metodyka pracy 10
2. 1. Model obiegu wodno-mułowego dla analizy porównawczej klasyfikacji hydraulicznej — grawitacyjnej i odśrodkowej oraz opis instalacji badawczej 11
2. 2. Opis instalacji doświadczalnej dla badania grawitacyjnej klasyfikacji hydraulicznej — gruboziarnistej . . . 13
2. 3. Opracowanie wyników obserwacji oraz statystyczna ocena charakterystyk liczbowych badanej zmiennej losowej . 14
3. Proces rozdziału faz: stała — stała w ośrodku wodnym w polu siły ciężkości i eksperymentalna weryfikacja przejętych wzorów analitycznych 16
3. 1. Analiza równania oporu ośrodka Stokes'a i wyznaczenie funkcji wyjściowej dla wartości parametru rozdziału procesu klasyfikacji grawitacyjnej d_{50}^{G} 16
3. 1. 1. Równanie ruchu ziarna w polu siły grawitacyjnej, obciążenie jednostkowe i parametr rozdziału procesu 16
3. 1. 2. Analiza wpływu rzeczywistych warunków przebiegu procesu rozdziału w osadniku na wartość parametru rozdziału, d_{50}^{G} 17
3. 1. 3. Skorygowana funkcja wyjściowa dla wyznaczenia parametru rozdziału klasyfikacji grawitacyjnej d_{50}^{G} 21
3. 2. Doświadczalna weryfikacja przyjętej funkcji wyjściowej — wzór (3.10') 22
3. 2. 1. Zestawienie i omówienie wyników badań na instalacji modelowej osadnika grawitacyjnego . . 22
3. 2. 2. Wyznaczenie funkcji wpływu koncentracji . . 27
3. 2. 3. Uogólnienie równania empirycznego 30
3. 3. Zastosowanie równania 3.23. do klasyfikacji „gruboziarnistej" w obiegu wodno-mułowym 32
4. Proces rozdziału faz: stała — stała w ośrodku wodnym przy wykorzystaniu siły odrodkowej i praktyczne wyznaczenie podstawowych parametrów technologicznych tego procesu . . 33
4. 1. Wydajność całkowita hydrocyklonu 33
4. 2. Technologiczne parametry pracy hydrocyklonu . . . 34
4. 3. Zestawienie i analiza wyników badań hydrocyklonu 540 mm 38
4. 4. Wyznaczenie nomogramów dla hydrocyklonów D = 540 i 280 mm 43
4. 5. Porównanie technologicznych charakterystyk pracy hydrocyklonów na podstawie sporządzonych nomogramów . 44
5. Porównanie procesu klasyfikacji hydraulicznej w polu grawitacyjnym oraz przy zastosowaniu siły odśrodkowej — wyznaczenie technologicznego kryterium porównawczego . . 45
5. 1. Wybór parametru do analizy porównawczej klasyfikacji grawitacyjnej i odśrodkowej 45
5. 2. Powierzchnia klasyfikacji i obciążenie jednostkowe hydrocyklonu 46
5. 3. Wielkość ziarna podziałowego jako funkcja obciążenia jednostkowego hydrocyklonu 48
5. 4. Wyznaczenie kryterium technologicznego 54
6. Wnioski 51
Zestawienie oznaczeń 52
Literatura 53

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 288

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA GLIWICE

P.3351/70

ZYGFRYD NOWAK

KLASYFIKACJA HYDRAULICZNA W OBIEGU WODNO-MUŁOWYM I TECHNOLOGICZNE KRYTERIUM JEJ STOSOWANIA

PRACA HABILITACYJNA Nr 100

(SKRÓT)

Data otwarcia przewodu habilitacyjnego 1. VI. 1970 r.

GLIWICE 1970

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Fryderyk Staub

REDAKTOR DZIAŁU

Jerzy Nawrocki

SEKRETARZ REDAKCJI

Witold Gużkowski

KOMITET REDAKCYJNY

Przewodniczący: Prof. n. dr hab. inż. Mirosław Chudek
Członkowie: Doc. dr hab. inż. Jerzy Antoniak
Doc. dr hab. inż. Kazimierz Chmura
Doc. dr hab. inż. Janusz Laskowski
Doc. dr inż. Florian Krasucki

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. M. Strzody 18

PŚ 290/70

Nakł. 50+170 Ark. wyd. 4 Ark. druk. 3,75 Papier offsetowy kl. III, 70x100, 70 g
Oddano do druku 10 6 1970 Podpis. do druku 27.7. 1970 Druk ukoń. we wrześniu 1970
Zam 894 6. 6. 1970 L-23 Cena zł 5,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

WSTĘP

Jednym z głównych procesów towarzyszących technologii mokrego wzbogacania węgli jest regeneracja wód obiegowych. Wody te po procesie wzbogacania stanowią mieszaninę dwóch faz: ciecz - ciało stałe.

W kolejnych operacjach jednostkowych procesu regeneracji ma zazwyczaj miejsce zmiana proporcji między składnikami mieszaniny. Zadaniem operacji jednostkowych jest:

- częściowy rozdział mieszaniny lub jej składników. Są to procesy rozdziału faz: stała - ciekła lub stała - stała w ośrodku ciekłym: klasyfikacja hydrauliczna, zagęszczenie, filtracja i inne,
- całkowity rozdział składników mieszaniny, możliwy jedynie przy zastosowaniu środków chemicznych - flokulacja - lub specjalnej przegrody filtracyjnej - filtracja ciśnieniowa.

Wymienione wyżej procesy rozdziału faz odbywają się przy wykorzystaniu siły ciężkości, sztucznie wytworzonej siły odśrodkowej lub ciśnienia.

Problemom rozdziału faz poświęca się obecnie wiele prac teoretycznych i doświadczalnych dla zintensyfikowania ich przebiegu, gdyż są to procesy kosztowne. Ich nieprawidłowy przebieg stanowi również potencjalne zagrożenie dla zanieczyszczenia wód publicznych. Jedną z istotnych operacji w procesie regeneracji wód obiegowych jest klasyfikacja hydrauliczna. Jej rola polega na wstępnym wydzieleniu fazy stałej z zawiesiny oraz przygotowaniu optymalnej charakterystyki zbioru ziarn do dalszych operacji. W klasyfikacji hydraulicznej wykorzystuje się siłę ciężkości lub sztucznie wywołaną siłę odśrodkową. Przebieg i parametry charakterystyczne klasyfikacji hydraulicznej, jak również zakres stosowania siły ciężkości lub odśrodkowej dla jej realizacji w przypadku regeneracji wód obiegowych ze wzbogacania węgli nie zostały dotychczas w pełni wyjaśnione.

W pracy podjęto próbę określenia związków ilościowych charakteryzujących te operacje. Wyznaczono związki występujące między procesem klasyfikacji hydraulicznej "grawitacyjnej" i "odśrodkowej". Związki te - wyznaczone analitycznie oraz zweryfikowane doświadczalnie pozwalają na podanie kryterium technologicznego stosowania klasyfikacji hydraulicznej w polu grawitacyjnym oraz w polu siły odśrodkowej w procesie regeneracji wód obiegowych zakładów przeróbczych.

1. OKREŚLENIE MIEJSCA KLASYFIKACJI HYDRAULICZNEJ W OBIEGU WODNO-MUŁOWYM ZAKŁADU PRZERÓBCZEGO

Pod pojęciem klasyfikacji hydraulicznej rozumie się rozdział faz stała - stała w ośrodku wodnym pod działaniem siły ciężkości lub sztucznie wytworzonej siły odśrodkowej.

W przypadku klasyfikacji hydraulicznej w polu grawitacyjnym parametrem rozdziału jest prędkość opadania ziarn pod działaniem siły ciężkości a środkami dla realizacji tego rozdziału - różnego rodzaju osadniki.

W przypadku klasyfikacji hydraulicznej - odśrodkowej rozdział faz odbywa się w wirującym strumieniu wodnym. Parametrem rozdziału jest prędkość opadania zbioru ziarn w polu siły odśrodkowej w hydrocyklonach.

1.1. Określenie obiegu wodno-mułowego zakładu przeróbki mechanicznej węgla

Obiegiem wodno-mułowym zakładu przeróbczego nazywa się zespół maszyn i urządzeń powiązanych z sobą w zamierzony sposób wraz z zawartą w nich wodą lub zawiesiną stosowaną w wodnych procesach wzbogacania kopalin.

Zadaniem obiegu wodno-mułowego jest regeneracja wody poprzez wydzielenie z niej części stałych dostających się w procesie wzbogacania oraz dostarczenie wody o odpowiednich parametrach jakościowych ponownie do procesu wzbogacania [2].

W nowoczesnych rozwiązaniach stosuje się taki układ maszyn i urządzeń, aby obieg wodno-mułowy był obiegiem zamkniętym tj. aby całość wody po jej zregenerowaniu była zawracana do procesu wzbogacania.

Zasadniczym warunkiem zamknięcia obiegu wodno-mułowego jest:

- zrównoważenie ilości części stałych wprowadzanych do obiegu z ilością mułu wyprowadzonego z obiegu,
- zrównoważenie ilości wód świeżych wprowadzanych do obiegu z wielkością strat wody obiegowej w procesie przeróbczym.

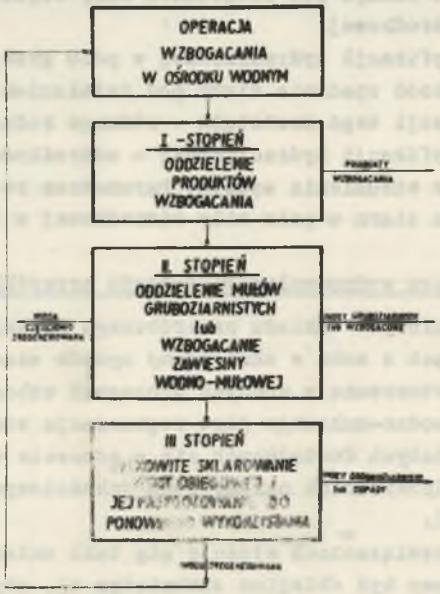
Z teoretycznego punktu widzenia pełny układ regeneracji wód obiegowych składa się z trzech głównych stopni wydzielania części stałych z obiegu rys. 1.

I stopień: Zadaniem pierwszego stopnia jest oddzielenie wody obiegowej wraz z mułami od produktów wzbogacania.

II stopień: Zadaniem urządzeń działających w obiegu w tym stopniu jest wydzielenie części mułów gruboziarnistych z obiegu lub w szczególnym przypadku wzbogacanie części lub całości zawiesiny znajdującej się w obiegu po jej uprzednim przygotowaniu. Oczyszczone w tym stopniu wody kierowane

są w całości do dalszej regeneracji lub zwracane częściowo - a w niektórych przypadkach w całości do procesu wzbogacania węgla. Ilość wody kierowanej do procesu wzbogacania jako zregenerowanej zależy od bilansu części stałych w obiegu.

III stopień: W trzecim stopniu regeneracji wody obiegowej stosuje się przeważnie całkowite sklarowanie wody przy zastosowaniu odczynników flokulacyjnych. Takie oczyszczanie wody zabezpiecza uzyskanie stanu równowagi obiegu pod względem koncentracji części stałych a w przypadku nadmiarów wody pozwala na jej odprowadzenie poza zakład przeróbczy bez zanieczyszczeń.



Rys. 1. Schemat blokowy obiegu wodno-mułowego

Oprócz trzech wymienionych wyżej stopni wprowadza się również tzw. osadniki zrzutowo-awaryjne, których nie można jednakże traktować jako IV stopień regeneracji, jak to ma często miejsce w praktyce. Niektóre obiegi są również rozbudowane w ten sposób, że między II a III stopień rozdziału wprowadza się dodatkowe urządzenia klasyfikujące dla częściowego wydzielenia fazy stałej z obiegu.

Ilość operacji jednostkowych wchodzących w skład procesu regeneracji wód obiegowych zależy od rodzaju węgla, zakresu jego wzbogacania i przeznaczenia mułów.

Budowa zakładów przeróbczych o coraz większych wydajnościach wymaga jednakże maksymalnego uproszczania technologii tych zakładów. Dąży się również do stosowania sprawdzonych zunifikowanych operacji jednostkowych i maszyn. Pierwszą pracą w tym zakresie jest systematyka operacji przeróbczych przygotowywana przez zespół pod kierunkiem T. Laskowskiego [19].

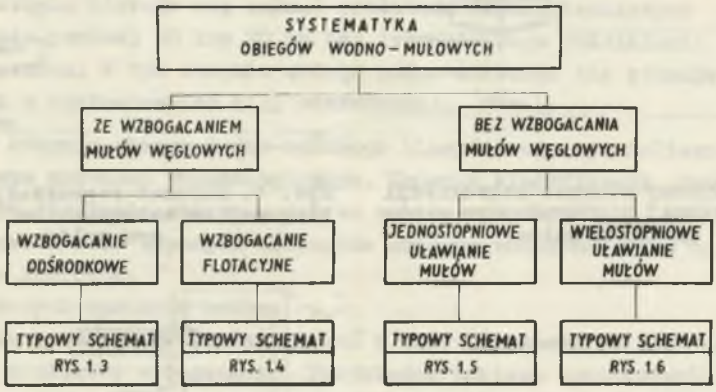
W pracy tej poświęcono oddzielny rozdział procesom wchodzącym w skład obiegów wodno-mułowych.

Zasady funkcjonalnego podziału zakładu przeróbczego opracowane przez J. Dietrycha [14] znalazły również potwierdzenie w obecnych rozwiązaniach gospodarki wodno-mułowej, której odrębność i specjalne traktowanie są niezbędne dla uzyskania założonych efektów technologicznych.

Schematy technologiczne obiegów wodno-mułowych uległy poważnym zmianom a ich ewolucja nasiliła się szczególnie od czasu wprowadzenia środków chemicznych dla przyspieszenia osadzania fazy stałej we wodzie [20, 27].

W tym zakresie istnieją różne poglądy i szkoły, których ocena możliwa jest tylko w nawiązaniu do dokładnej znajomości właściwości surowca podlegającego wzbogacaniu i fazy stałej przechodzącej do zawiesiny.

Na rys. 2 przedstawiono opracowaną systematykę obiegów wodno-mułowych zmierzającą do ich uporządkowania w zależności od rodzaju mułów węglowych oraz przyjętej technologii ich wydzielania z obiegów wodno-mułowych.



Rys. 2. Systematyka obiegów wodno-mułowych

Zgodnie z tą systematyką podzielono wszystkie obiegi na dwie podstawowe grupy:

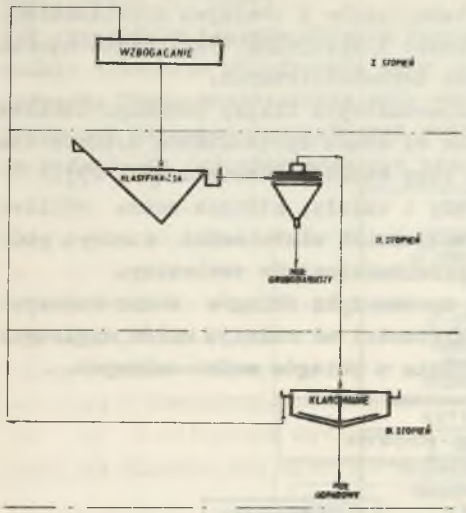
- ze wzbogacaniem mułów i wydzielaniem z obiegu dwóch produktów: mułów użytecznych i odpadowych,
- bez wzbogacania mułów z wydzielaniem ich w całości jako muły użyteczne.

W pierwszym przypadku dokonano dalszego podziału tych obiegów w zależności od zastosowanej metody wzbogacania mułów.

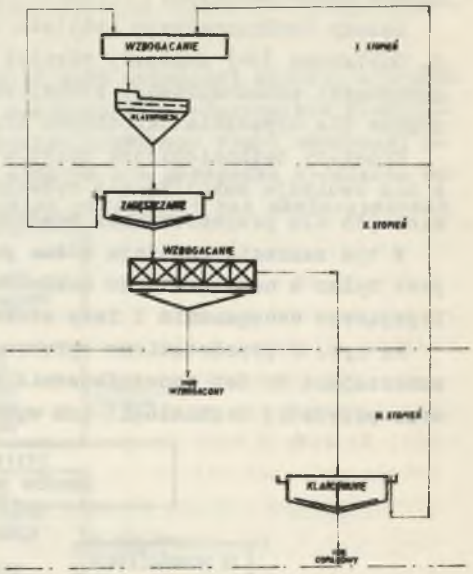
W drugim przypadku dokonano podziału w zależności od przyjętego podstawowego założenia prowadzenia procesu wydzielania mułu z obiegu: jednostopniowego lub wielostopniowego.

Dla tak opracowanej systematyki podano na rys. 3, 4, 5, 6 typowe schematy technologiczne reprezentujące poszczególne grupy obiegów wodno-mułowych.

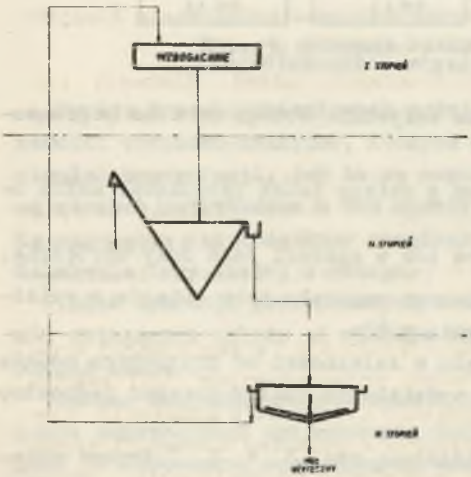
Przedstawione przykładowo schematy nie wyczerpują ilości kombinacji możliwych w poszczególnych grupach.



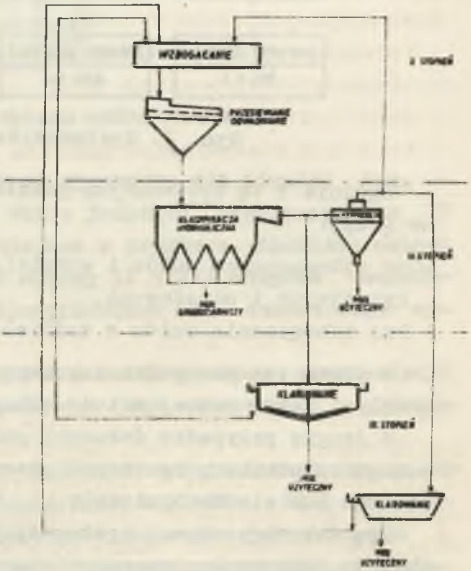
Rys. 3. Typowy schemat regeneracji wody obiegowej z odśrodkowym wzbogacaniem mułów



Rys. 4. Schemat regeneracji wody obiegowej ze wzbogacaniem flotacyjnym mułów



Rys. 5. Typowy schemat regeneracji wody obiegowej z zastosowaniem jednostopniowego uławiania mułów



Rys. 6. Typowy schemat regeneracji wody obiegowej z wielostopniowym uławianiem mułu

1.2. Klasyfikacja hydrauliczna w obiegu wodno-mułowym

Zadania klasyfikacji hydraulicznej w obiegu wodno-mułowym wynikają z definicji obiegu wodnego a zakres jej stosowania zależy od surowca oraz koncepcji technologicznej przyjętej dla schematu regeneracji zawiesin występujących w obiegu.

W klasycznym rozwiązaniu obiegu wodno-mułowego z zachowaniem wszystkich stopni wydzielania mułów jak to przedstawiono na schemacie - rys. 1 zadania i środki klasyfikacji hydraulicznej ograniczają się do I i II stopnia i są następujące:

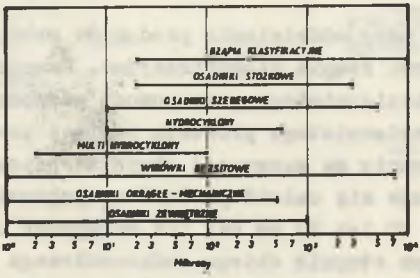
- W pierwszym stopniu przy oddzielaniu produktów wzbogacania od wody obiegowej stosuje się tzw. rząpia klasyfikacyjne. Rząpia te pracują z odbiorem produktu gruboziarnistego przy pomocy podnośników odwadniających lub z odbiorem gruboziarnistego produktu poprzez pompę. Klasyfikacja hydrauliczna w tym stopniu ma zazwyczaj charakter operacji zasadniczej, gdyż do rząpia kieruje się całość produktów drobnoziarnistych procesu wzbogacania poniżej 10 lub 20 mm bez ich wstępnego oddzielania np. na przesiewaczach. W tym stopniu obiegu wodno-mułowego nie stosuje się klasyfikacji z zastosowaniem siły odśrodkowej.
- W drugim stopniu obiegu wodno-mułowego klasyfikacja hydrauliczna jest podstawowym procesem technologicznym. Zadania klasyfikacji hydraulicznej w tym elemencie obiegu - jak to wynika z systematyki przedstawionej na rys. 2 oraz typowych schematów obiegów wodno-mułowych na rys.3-6 są bardzo szerokie.

  Z ważniejszych wymienić można:
  - wydzielanie mułów gruboziarnistych z wody obiegowej po jej oddzieleniu od produktów wzbogacania. Przykładem takiego zastosowania klasyfikacji hydraulicznej jest schemat przedstawiony na rys. 6
  - kontrolna klasyfikacja zawiesin wodno-mułowych przed flotacją lub przed III stopniem regeneracji wody obiegowej. Rozwiązanie takie przedstawiono na rys. 5
  - wzbogacanie zawiesiny wodno-mułowej poprzez wydzielenia z niej częściowe lub całkowite zawartych w niej części ilastych. Zadanie to spełnia hydrocyklon przedstawiony na rys. 3, gdzie jego rola polega na poprawie jakości mułów wydzielanych z obiegu części stałych traktowanych jako produkt użyteczny.

W praktyce przemysłowej zadania powyższe spełniają w angielskiej koncepcji regeneracji wód obiegowych tzw. "wieże sedymentacyjne" [26] osadniki szeregowe stosowane w starych rozwiązaniach niemieckich koncepcji regeneracji wód obiegowych [30] lub też przyjęta w polskiej koncepcji regeneracji wód obiegowych zasada stosowania osadników mechanicznych okrągłych [4] obok osadników szeregowych. We wszystkich ww. koncepcjach jedynym odpowiednikiem ww. urządzeń dla klasyfikacji hydraulicznej odśrodko-

wej są hydrocyklony [1, 21]. Podstawienie wzajemne tych urządzeń w obiegu wodno-mułowym oraz wyznaczona im rola na tym stopniu regeneracji wody obiegowej nie została jeszcze jednoznacznie określona i jest przedmiotem dyskusji oraz prac teoretycznych i eksperymentalnych.

Na podstawie dotychczasowych wyników praktycznych można dokonać zestawienia zakresu stosowania różnych urządzeń w zależności od wielkości wymaganego ziarna podziałowego procesu klasyfikacji. Zestawienie takie przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Zakres stosowania klasyfikacji i urządzeń klasyfikacyjnych w przeróbce mechanicznej węgla

2. ZAKRES I METODYKA PRACY

Jako podstawowy parametr charakteryzujący proces klasyfikacji przyjęto wielkość ziarna podziałowego wyznaczoną na podstawie krzywej rozdziału [32]. Przyjęcie tak zdefiniowanego ziarna podziałowego jest pewnym uproszczeniem, gdyż rzeczywiste krzywe rozdziału nie są zazwyczaj dystrybuantami rozkładu normalnego. Jednakże taka metoda jest powszechnie w świecie stosowana dla opisu procesów rozdziału.

W pracy postawiono następujące zadania:

1. Wyznaczenie empirycznej funkcji parametru rozdziału dla klasyfikacji hydraulicznej - grawitacyjnej.
2. Ocena zakresu stosowania wyznaczonej funkcji parametru rozdziału.
3. Wyznaczenie zależności występujących między charakterystyką pracy hydrocyklonu a charakterystyką rozdzielanej w nim zawiesiny.
4. Wyznaczenie kryterium technologicznego stosowania klasyfikacji grawitacyjnej i odśrodkowej na podstawie analizy porównawczej tych procesów.

Program badań przyjęty w pracy wynika z zakresu stosowania klasyfikacji hydraulicznej w obiegu wodno-mułowym zakładu przeróbczego. W związku z tym dokonano analizy procesu klasyfikacji grawitacyjnej stosowanej w I i II stopniu regeneracji wody obiegowej oraz analizy działania hydrocyklonów w obiegu wodno-mułowym. Bazą wyjściową do badań modelowych są typowe schematy obiegów wodno-mułowych przedstawione w rozdziale 1 oraz urzą-

dzenia stosowane w tych obiegach. Urządzeniami, dla których przeprowadzono badania modelowe były:

- osadniki okrągłe - mechaniczne stosowane do klasyfikacji w II stopniu regeneracji wody obiegowej,
- osadniki stożkowe lub ostrosłupowe - głębokie stosowane w I stopniu regeneracji wody obiegowej,
- hydrocyklony stosowane w zakładach przeróbczych w Polskim Przemyśle Węglowym.

Dla praktycznej realizacji postawionych wyżej zadań przyjęto następującą metodykę badań:

- w przypadku klasyfikacji grawitacyjnej przyjęto typową metodykę wyznaczania wzorów empirycznych tj. od analizy ogólnych zależności matematycznych charakteryzujących dany proces, poprzez wyprowadzenie funkcji wyjściowej o ogólnej postaci, do jej doświadczalnej weryfikacji i wyznaczenia końcowej postaci wzoru empirycznego,
- w przypadku klasyfikacji hydraulicznej - odśrodkowej zastosowano odmienną metodykę. Przyjęto stosowaną w metodologii badawczej drogę graficznego wyznaczania zależności występujących w procesach technologicznych oraz podania końcowych wyników w postaci nomogramów. Przyjęcie takiej metodyki uzasadnione jest brakiem jednoznacznej funkcji wyjściowej do badań modelowych. W związku z tym, część doświadczalną dotyczącą klasyfikacji odśrodkowej oparto na wynikach badań hydrocyklonów przemysłowych a nie ich laboratoryjnych modeli.

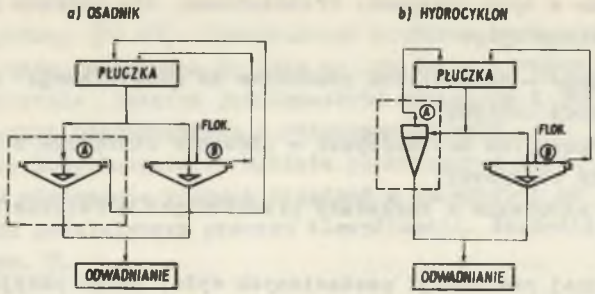
  W badaniach uwzględniono:
  - parametry procesu
    - wydatek objętościowy
    - rozdział ilościowy zawiesiny na produkty klasyfikacji
  - parametry zawiesiny w procesie
    - koncentracja nadawy
    - skład ziarnowy nadawy
    - koncentracja produktów klasyfikacji
    - skład ziarnowy produktów klasyfikacji.

2.1. Model obiegu wodno-mułowego dla analizy porównawczej klasyfikacji hydraulicznej - grawitacyjnej i odśrodkowej oraz opis instalacji badawczej

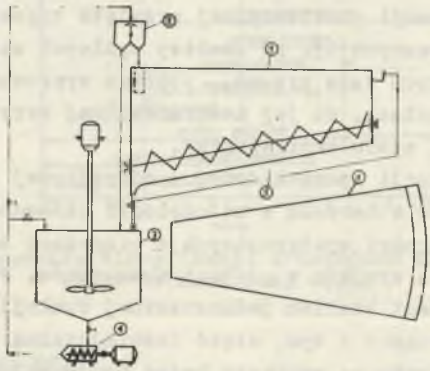
Na rys. 8 przedstawiono dwa schematy obiegu wodno-mułowego z zastosowaniem klasyfikacji hydraulicznej grawitacyjnej i odśrodkowej. Takie rozwiązania są typowe dla niektórych zakładów przeróbczych a przedstawiony uproszczony schemat stanowi podstawę dalszych badań.

Dla analizy tej operacji wykonano dwie modelowe instalacje badawcze.

Schemat stanowiska badawczego wraz z modelem osadnika grawitacyjnego przedstawiono na rys. 9.



Rys. 8. Schematy ideowe stosowania hydrocyklonu i osadnika w obiegu wodno-mułowym



Rys. 9. Schemat stanowiska badawczego do badań klasyfikacji grawitacyjnej - model osadnika mechanicznego okrągłego

Osadnik modelowy 1, stanowił wycinek okrągłego osadnika o następujących parametrach konstrukcyjnych:

- promień wycinka osadnika - 1450 mm,
- wysokość osadnika - 650 mm,
- długość łuku wycinka koła - 650 mm.

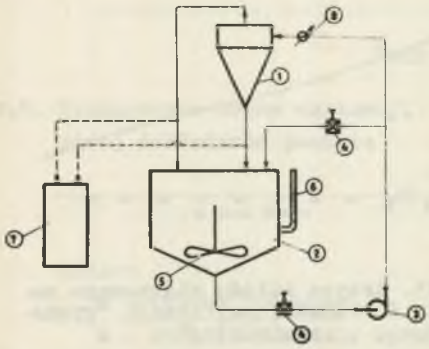
Powierzchnia osadnika wynosiła 0,58 m^2.
Dla ciągłego odbioru materiału osadzonego z dna osadnika wykonano przenośnik ślimakowy zastępujący ruch mechanizmu zgarniającego w typowym osadniku mechanicznym.
Istniała podwójna możliwość regulacji obciążenia osadnika: przez zmianę wydajności pompy 4 oraz zmianę położenia dozownika nadawy, 2 na osadnik. Maksymalny zakres regulacji wynosi od 0 do 6 m^3/m^2h.

Badania hydrocyklonów przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiony jest na rys. 10. Stanowisko to składało się z hydrocyklonu 1, zbiornika nadawy 2, pompy 3, zespołu zaworów regulacyjnych 4, mieszadła 5, rury pomiarowej dla pomiaru zapełnienia zbiornika 6 zbiorników pomiarowych 7, manometru 8.

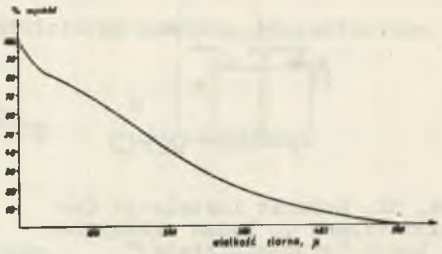
Hydrocyklon o średnicy 540 mm, będący przedmiotem pełnego cyklu doświadczeń posiadał wymienne końcówki wylewowe: 60, 80, 100 mm.

Zawory regulacyjne umożliwiały uzyskiwanie dowolnych wydajności i dowolnego ciśnienia wlotowego do hydrocyklonu.

Cała instalacja badawcza pracowała w obiegu zamkniętym. W czasie poszczególnych prób istniała możliwość wykonania pomiarów ilościowych i pobrania jakościowych prób nadawy i produktów hydrocyklonu.



Rys. 10. Schemat instalacji doświadczalnej do badań modelowych klasyfikacji w hydrocyklonie



Rys. 11. Krzywa składu ziarnowego materiału do badań modelowych klasyfikacji grawitacyjnej i odśrodkowej

Przedmiotem badań była zawiesina wodno-mułowa o składzie ziarnowym i ciężarze właściwym części stałych typowym dla polskich warunków. Krzywa składu ziarnowego - średnia dla badań - przedstawiona jest na rys. 11. Ciężar właściwy części stałych wynosił 1,45 g/cm^3 ± 0,02 g/cm^3.

Badania prowadzone były dla zakresu zmian zagęszczeń od 0 do 250 g/l.

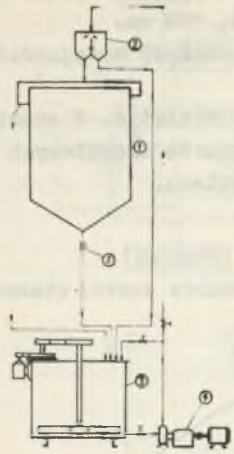
2.2. Opis instalacji doświadczalnej dla badania grawitacyjnej klasyfikacji hydraulicznej - gruboziarnistej stosowanej w I stopniu regeneracji wody obiegowej

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 12 [8]. Model osadnika stożkowego 1 posiadał następujące parametry konstrukcyjne:

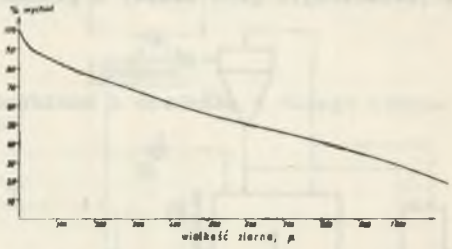
- średnica osadnika - 600 mm
- wysokość części cylindrycznej osadnika - 900 mm,
- zbieżność części stożkowej - 80^0
- powierzchnia osadnika - 0,275 m^2.

Przez zastosowanie dozownika, 2 oraz regulacji pompy 4, zapewniona była możliwość zmian obciążenia od 0 do 160 m^3/m^{2}h bez wpływu na charakterystykę zawiesiny stosowanej do badań. Przedmiotem badań była zawiesina wodno-węglowa o uziarnieniu 10-0 mm. Charakterystyka granulometryczna przedstawiona jest na rys. 13.

Doświadczenia przeprowadzono dla dwóch zagęszczeń: 60 i 120 g/l.



Rys. 12. Schemat instalacji doświadczalnej do badań klasyfikacji "gruboziarnistej"



Rys. 13. Krzywa składu ziarnowego materiału do badań klasyfikacji "gruboziarnistej"

2.3. Opracowanie wyników obserwacji metodą najmniejszych kwadratów oraz statystyczna ocena charakterystyk liczbowych badanej zmiennej losowej [6, 11, 13, 15]

1. Proces klasyfikacji hydraulicznej ma charakter stochastyczny [6] i dla jego opisu wykorzystano stosowane powszechnie metody statystyki matematycznej. Krzywe regresji oraz ich współczynniki wyznaczono przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów.

Zgodnie z definicją tej metody suma "S" kwadratów odchyleń E_i między obserwowaną wartością badanego zjawiska a funkcją aproksymującą $y = c + nx$ powinna być najmniejsza:

$$S = \sum_{1}^{n} (\bar{y} - y)^2 = \min$$

gdzie:

n - ilość pomiarów wartosci $\bar{y}$ x).

Po rozwinięciu powyższego równania i zróżniczkowaniu względem n oraz c otrzymujemy w końcowym efekcie wartości liczbowe współczynników n i c równania $y = c + nx$ a następnie postać liczbową równania wyjściowego charakteryzującego przebieg konkretnej zależności funkcyjnej.

2. Ocena statystyczna współczynników regresji.

2.1. Sprawdzenie poprawności wyznaczenia współczynników n i c

2.2. Wyznaczenie wartości współczynników charakterystycznych Mn oraz Mc potrzebnych dla wyznaczenia oceny wariancji współczynników n i C.

x) Oznaczenie symboli podano na końcu pracy.

2.3. Obliczenie odchyleń E_i między wartością mierzoną $\bar{y}$ a wartością y wyznaczoną na podstawie liniowej formy równań aproksymujących dla poszczególnych wartości x

$$E_i = \bar{y} - y$$

2.4. Obliczenie sumy S_{min} kwadratów odchyleń E_i

$$S_{min} = \sum_{1}^{n} E_i^2$$

2.5. Wyznaczenie oceny wariancji σ^2 oddzielnego pomiaru charakteryzującej dokładność pomiaru

$$\sigma^2 = \frac{S_{min}}{n - 1 - m}$$

gdzie:

n - liczba pomiarów,

m - stopień równania aproksymującego.

2.6. Wyznaczenie oceny wariancji współczynników równań empirycznych n i C charakteryzującej dokładność tych współczynników

$$\sigma_n^2 = M_n \sigma^2; \qquad \sigma_c^2 = M_c \sigma^2$$

3. Wyznaczenie poziomu i przedziału ufności.

3.1. Pewność otrzymanych wartości x charakteryzuje prawdopodobieństwo

$$P\left\{|x - \bar{x}| < \varepsilon_u\right\} = \alpha$$

gdzie:

$x - \varepsilon_u$, $x + \varepsilon_u$ - przedział ufności charakteryzujący dokładność otrzymanego wyniku,

α - poziom ufności oznaczający prawdopodobieństwo, że nieznany parametr x znajduje się w przedziale o końcach losowych $(x - \varepsilon_u,\ x + \varepsilon_u)$.

3.2. Wyznaczenie przedziału ufności dla oceny $\bar{x}$. Z rozkładu t Studenta wyznacza się

$$\varepsilon_u = \frac{t_\alpha \sigma}{\sqrt{n}}$$

stąd przedział ufności dla oceny x przy poziomie ufności wynosi:

$$\left| x - \frac{t_\alpha \bar{\sigma}}{\sqrt{n}}, \quad x + \frac{t_\alpha \bar{\sigma}}{\sqrt{n}} \right|$$

gdzie t_α są wartościami podanymi w tablicach rozkładu Studenta.

3.3. Wyznaczenie przedziału ufności z rozkładu χ^2 (chi kwadrat) dla oceny odchylenia standartowego σ.

Pewność otrzymanych wartości charakteryzuje prawdopodobieństwo

$$P\left\{ \gamma_1 \bar{\sigma} < \sigma < \gamma_2 \bar{\sigma} \right\} = \alpha$$

gdzie:

γ_1, γ_2 są współczynnikami wyznaczonymi z tablic rozkładu χ^2.

3.4. Obliczenie przedziału ufności dla wartości n i C. Obliczenie wykonano przy założeniu

$$\alpha = 0{,}90 \quad \text{oraz} \quad k = n - m$$

- dla oceny C przedział ufności wynosi

$$C - t_\alpha \cdot \bar{\sigma}_c < E(C) < C + t_\alpha \cdot \bar{\sigma}_c$$

gdzie: t_α wyznaczono z tablic dla przyjętych α i k stąd wyznacza się dalej E(c) oraz przedział ufności dla C - dla oceny n postępujemy podobnie.

3. PROCES ROZDZIAŁU FAZ: STAŁA-STAŁA W OŚRODKU WODNYM W POLU SIŁY CIĘŻKOŚCI I EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA PRZYJĘTYCH WZORÓW ANALITYCZNYCH

3.1. Analiza równania oporu ośrodka wg Stokesa i wyznaczenie funkcji wyjściowej dla wartości parametru rozdziału procesu klasyfikacji grawitacyjnej d^G_{50}

3.1.1. Równanie ruchu ziarna w polu siły grawitacyjnej, obciążenie jednostkowe i parametr rozdziału procesu klasyfikacji grawitacyjnej

Analiza przebiegu procesu klasyfikacji pozwala na przyjęcie jako założenia wyjściowego słuszności równania oporu ośrodka podanego przez Stokesa [2, 10, 31].

Różniczkowe równanie ruchu pojedynczego ziarna kulistego w polu grawitacyjnym można napisać w następującej ogólnej postaci:

$$m \frac{dv}{dt} = G - A - W \qquad 3.1$$

Dla ruchu laminarnego otrzymujemy po wstawieniu funkcji G, A, W:

$$\frac{dv}{dt} = (\gamma_z - \gamma_c)\frac{g}{\gamma_z} - \frac{18g \cdot \eta_o \cdot v}{d^2 \gamma_z} \qquad 3.2$$

Dla stanu równowagi między siłami masowymi z oporem ośrodka uzyskuje się końcowy wzór Stokesa na prędkość opadania:

$$v = \frac{d^2(\gamma_z - \gamma_c)}{18 \eta_o} \qquad 3.3$$

Kryterium rozdziału dla osadnika stanowi równowaga prędkości opadania ziarna v_z i prędkości przepływu cieczy, v_c:

$$v_z = v_c \qquad 3.3$$

zgodnie z równaniem 3.3 otrzymamy dla prędkości opadania:

$$v_z = \frac{d^2 (\varrho_z - \varrho_c)}{18 \eta_o} g \qquad 3.4$$

z drugiej strony wiadomo, że prędkość przepływu cieczy:

$$v_c = \frac{V_N}{F_G} = q_G \qquad 3.5$$

Ten stosunek q_G nazywamy obciążeniem jednostkowym osadnika. W praktyce w czasie nieprzerwanej pracy osadnika z ciągłym odbiorem mamy do czynienia z prędkością mniejszą z uwagi na stałe odprowadzenie pewnej objętości zawiesiny otworem dolnym (wylew) osadnika.

Czynnik ten zostanie uwzględniony przy wprowadzeniu współczynników korygujących.

Wstawiając wartości 3.3 i 3.5 do równania 3.4 otrzymamy dla ziarna podziałowego

$$d_{50}^G = \sqrt{\frac{18 \eta_o}{(\varrho_z - \varrho_c) g}} \sqrt{\frac{V_N}{F_G}} \qquad 3.6$$

lub

$$d_{50}^G = \sqrt{\frac{18 \eta_o}{(\varrho_z - \varrho_c) g}} \sqrt{q_G} \qquad 3.6$$

3.1.2. <u>Analiza wpływu rzeczywistych warunków przebiegu procesu rozdziału w osadniku na wartość parametru rozdziału, d_{50}^G</u>

Zastosowanie przedstawionego wyżej wzoru na wielkość ziarna podziałowego w praktyce jest ograniczone następującymi czynnikami:

- odnosi się do pojedynczego ziarna,
- nie uwzględnia rzeczywistego kształtu ziarna,
- nie uwzględnia skrępowanych warunków opadania występujących w zawiesinie,
- nie uwzględnia rzeczywistego profilu przepływu zawiesiny w osadniku.

Wpływ lepkości zawiesiny

Wpływ lepkości zawiesiny na zmianę warunków sedymentacji wynika z podstawowej zależności wyznaczonej przez Einsteina i Smoluchowskiego [2, 10, 31].

$$\rho = \rho_0 (1 + k\varepsilon) \qquad 3.7$$

Ciborowski [10] przyjmuje k = 4,5. Wartość ρ/ρ_0 nosi nazwę lepkości względnej. W rzeczywistości jednakże zagadnienie lepkości jest bardziej skomplikowane [36, 34, 35]. Wzór 3.7 ograniczony jest górną wartością $\varepsilon = 0{,}02$ [2] co dla warunków niniejszych badań daje wartość β_N w granicach 30 g/l. J. Laskowski w analizie tego zagadnienia [17] oprócz koncentracji wymienia takie czynniki jak: powierzchnia właściwa zbioru ziarn obecność koloidów, stabilność zawiesiny będąca funkcją jej własności reologicznych i inne. Whitmore [35] stwierdza istnienie warstwy cieczy otaczającej bezpośrednio ziarna niekuliste, która porywana jest razem z opadającym ziarnem upodobniając jego kształt do ziarna kulistego a jego ruch do ruchu ziarna kulistego o zredukowanej gęstości. Dla takiego zbioru ziarn uzyskuje się przebiegi funkcji: lepkość - koncentracja o podobnych charakterystykach dla ziarn o kulistych i niekulistych kształtach.

Whitmore w swoich badaniach przyjmuje jako funkcję wyjściową dla lepkości zawiesin równanie lepkości pozornej Binghama:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - k\varepsilon} \qquad 3.8$$

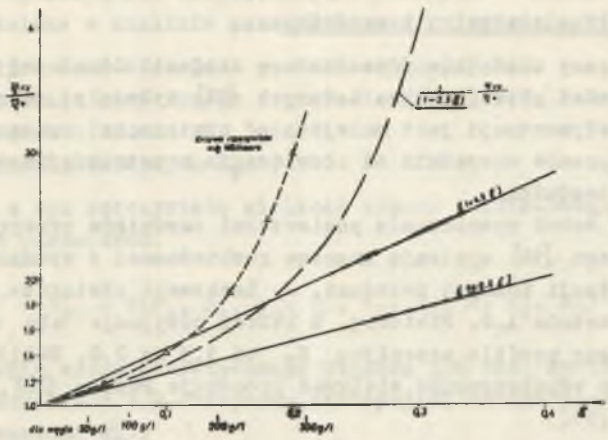
Wg Binghama [7] wartość k dla ziarn kulistych wynosi 2.5.

Na rys. 14 przedstawiono zasadniczą różnicę tych dwóch funkcji 3.7 i 3.8. Na rys. 14 naniesiono również rzeczywiste wyniki uzyskane przez Whitmora w badaniach nad lepkością zawiesin modelowych. Widać, że krzywa rzeczywistej lepkości ma przebieg typu funkcji 3.8 a wartość k wynosi około 3.5.

Podobne krzywe uzyskał Walt [34] w badaniach lepkości zawiesinowych cieczy ciężkich. Z rysunku 14 widać również, dlaczego równanie 3.7 posiada ograniczony zakres do $\varepsilon = 0{,}02$.

Na podstawie powyższej analizy można przyjąć, że dla ustabilizowanych warunków panujących w obiegu wodno-mułowym lepkość ρ będzie funkcją koncentracji. W związku z tym we wzorze Stokesa dla zbioru ziarn występować

będzie lepkość pozorna ρ . Postać matematyczna tej funkcji może być przedstawiona równaniem ogólnym 3.8.



Rys. 14. Lepkość pozorna zawiesin jako funkcja koncentracji fazy stałej w zawiesinie

Kształt ziarn w zawiesinie

Ustalenie wpływu rzeczywistego kształtu ziarna na przebieg procesu opisanego analitycznie przy założeniu kulistego kształtu jest bardzo skomplikowane. Dla uwzględnienia tego wpływu wprowadza się najczęściej współczynniki korygujące. Współczynniki te zazwyczaj uzyskuje się przez porównanie jednej z cech fizycznych ziarna rzeczywistego np. jego powierzchni lub objętości, z taką samą cechą ziarna kulistego o tej samej średnicy i wyznaczenie w ten sposób współczynnika kształtu [33, 36].

Whitmore [35] podaje odmienną interpretację kształtu ziarna. Z jego badań wynika, że ziarno w wodzie otoczone jest poruszającą się wraz z nim warstwą cieczy, która upodabnia ziarno niekuliste do elastycznej kuli o odpowiednio zredukowanej gęstości. Ilość cieczy zatrzymywanej na powierzchni ziarna jest proporcjonalna do powierzchni właściwej tego ziarna.

Wartości liczbowe współczynników kształtu ziarna przyjmowane są w granicach od 1,2 - 1,6.

Z badań prowadzonych w tym zakresie wynika, że zagadnienie kształtu ziarna nie jest jeszcze wystarczająco rozeznane. Dotyczy to szczególnie

ruchu zbioru ziarn w cieczy, gdzie nakładają się na siebie wpływ skrępowanego opadania zbioru oraz wpływ kształtu pojedynczego ziarna w tym zbiorze. Należy przyjąć, że przy opadaniu zbioru ziarn wpływ ich kształtu zawarty jest w funkcji pozornej lepkości mieszaniny dwufazowej.

Profil przepływu zawiesiny w osadniku

Badania pracy osadników prowadzone w Akademii Górniczej we Freibergu [12] jak również przez Pawłowa i innych [28] wykazały, że rzeczywista powierzchnia sedymentacji jest mniejsza od powierzchni samego osadnika. Różnice zależą przede wszystkim od rozwiązania konstrukcyjnego urządzenia nadawczego do osadnika.

Z analizy metod wyznaczania powierzchni osadników przeprowadzonej przez J. Laskowskiego [18] wynikają znaczne rozbieżności w wyznaczaniu powierzchni sedymentacji różnymi metodami. J. Laskowski stwierdza, że najlepsze wyniki daje metoda A.G. Freiberg, w której przyjmuje się wartość współczynnika zmiany profilu przepływu K_F od 1,3 do 2,0. Zbliżoną do dolnej wartości tego współczynnika wielkość proponuje Pawłow [28]. Podaje on wartość $K_F = 1,33$.

Rozdział ilościowy produktów osadnika

W praktyce ma miejsce stałe wynoszenie osadzonego mułu co powoduje, że prędkość przepływu zawiesiny w odniesieniu do powierzchni klasyfikacji jest mniejsza od podanej w wzorze 3.5. Ogólnie wskaźnik rozdziału ilościowego można zdefiniować jako stosunek ilości zawiesiny wyprowadzonej otworem dolnym do całkowitej ilości zawiesiny wprowadzonej do osadnika [25]

$$R = \frac{V_W}{V_N}$$

W związku z tym dla prędkości v_c - wzór 3.5 - otrzymamy:

$$v_c = \frac{V_N}{F_G}(1 - R) \qquad 3.9$$

Wskaźnik R wyznaczyć można również na podstawie znajomości zagęszczeń nadawy i produktów osadnika

$$R = \frac{\beta_N - \beta_P}{\beta_W - \beta_P}$$

W praktyce przemysłowej wartość R waha się w granicach 0,1-0,15 z uwagi na dążenie do uzyskania maksymalnych zagęszczeń wylewu osadnika.

3.1.3. Skorygowana funkcja wyjściowa dla wyznaczenia parametru rozdziału procesu klasyfikacji grawitacyjnej d_{50}^{G}

Dla uzyskania rozszerzonej postaci funkcji wyjściowej parametru rozdziału wprowadzono do wzoru na wielkość ziarna podziałowego równania 3.6. funkcje lub współczynniki uwzględniające rzeczywiste warunki przebiegu klasyfikacji ustalone w analizie przedstawionej w rozdziale 3.1.2. Są to:

- funkcje wpływu koncentracji o postaci ogólnej 3.8,
- funkcje rozdziału ilościowego o postaci ogólnej 3.9,
- parametr kształtu ziarna K_d oraz
- parametr profilu przepływu K_F.

W związku z tym rzeczywista wielkość ziarna podziałowego jest funkcją następujących parametrów:

$$d_{50}^{G} = f(\varrho_z, \varrho_c, \varrho_o, \varrho_1, V_N, F_G, R, K_d, K_F)$$

Po uwzględnieniu wzoru teoretycznego Stokesa 3.6 oraz wyników analizy wykonanej w rozdziale 3.1.2 otrzymamy następującą ogólną postać wzoru wyjściowego na wartość d_{50}^{G}:

$$d_{50}^{G} = \underbrace{\sqrt{\frac{18\varrho_o}{g(\varrho_z-\varrho_c)}}}_{\text{funkcja ciężaru właściwego}} \underbrace{\sqrt{\frac{1}{1-k\varepsilon}}}_{\text{funkcja wpływu koncentracji fazy stałej w zawiesinie}} \underbrace{\sqrt{V_N(1-R)}}_{\text{funkcja skorygowanego obciążenia osadnika}} \underbrace{\sqrt{K_d}}_{\text{parametr kształtu ziarna}} \underbrace{\sqrt{\frac{1}{K_F F_G}}}_{\text{funkcja profilu przepływu zawiesiny w osadniku}} \qquad 3.10$$

Można w dalszym ciągu stwierdzić:

1. Funkcja ciężaru właściwego dla danego materiału ma wartość stałą i można jej nie uwzględniać przy weryfikacji doświadczalnej wzoru 3.10.
2. Funkcja wpływu koncentracji ma zasadnicze znaczenie dla ustalenia rzeczywistej wartości parametru podziału. Jest to w rzeczywistości funkcja zmian warunków sedymentacji spowodowanych zmianą koncentracji zawiesiny i odzwierciedla lepkość pozorną układu.
3. Dla ustabilizowanych warunków pracy osadnika przemysłowego funkcja skorygowanego obciążenia posiada wartość stałą R = const.
4. Dla celów praktycznych wystarczające jest przyjęcie stałej wartości parametru kształtu ziarna wynikającego z jego cech fizycznych K_d=const.
5. Funkcja profilu przepływu ma wartość stałą K_F = const.

Wynika stąd konieczność zwrócenia zasadniczej uwagi na wyznaczenie funkcji wpływu koncentracji. Po uwzględnieniu powyższych rozważań otrzymujemy wzór 3.10 jako funkcję wyjściową do badań modelowych:

$$\left.\begin{aligned} d_{50}^{G} &= K \cdot f(\beta_N) \cdot \sqrt{\frac{V_N}{F_G}} \\ \text{lub} \qquad & \\ d_{50}^{G} &= K \cdot f(\varepsilon) \sqrt{q_G} \end{aligned}\right\} \qquad 3.10$$

3.2. Doświadczalna weryfikacja przyjętej funkcji wyjściowej - wzór (3.10)

3.2.1. Zestawienie i omówienie wyników badań wykonanych na instalacji modelowej osadnika grawitacyjnego

Z własności funkcji wyjściowej wzór 3.10 wynika, że w logarytmicznym układzie powinno się otrzymać prostą o kącie nachylenia, którego tg równa się wykładnikowi potęgowemu przyporządkowanemu obciążeniu jednostkowemu osadnika q_G. Stanowi to pierwsze założenie przyjęte w analizie wyników badań instalacji modelowej. Drugim założeniem jest przyjęcie przesunięcia prostych wyznaczonych dla różnych koncentracji jako funkcji koncentracji - lepkości przy stałych pozostałych parametrach procesu zgodnie z równaniem 3.10.

Założenia te można zapisać w postaci funkcji

$$d_{50}^{G} = C \cdot q^{n} \qquad 3.11$$

gdzie C będzie funkcją wpływu koncentracji zawiesiny wprowadzonej do osadnika przy zachowaniu stałości pozostałych parametrów wchodzących w skład funkcji wyjściowej (3.10).

Z analizy przebiegu procesu osadzania można dalej przyjąć, że występują dwa zakresy wpływu koncentracji:

- zakres niskich koncentracji, gdzie wpływ tego parametru będzie mały - być może do pominięcia w praktyce,
- zakres wyższych koncentracji zawiesiny wywierający decydujący wpływ na wielkość rozdziału.

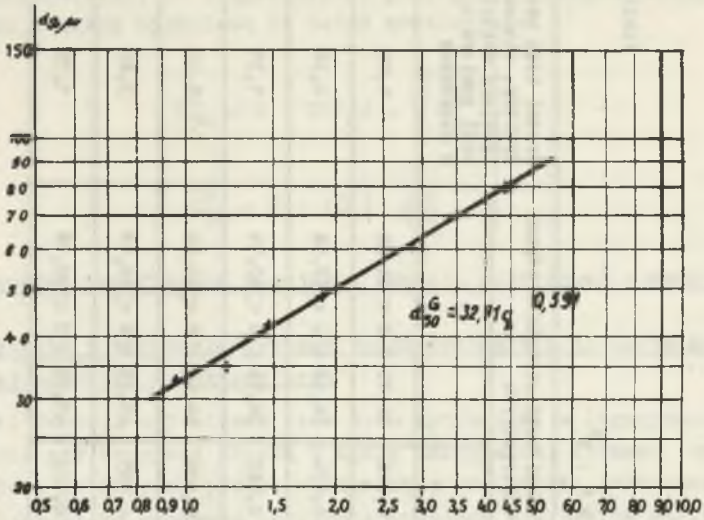
Poszczególne doświadczenia pogrupowane były w serie, w których stałym parametrem była koncentracja fazy stałej. Końcową fazą opracowania każdej serii doświadczeń było wyznaczenie krzywej rozdziału i wielkości ziarna podziałowego.

Na tej podstawie wyznaczono współczynniki C i n równania 3.11. Wartości tych parametrów zestawione są w tablicy 1 dla różnych zagęszczeń. W tablicy 1 zestawione są również wyniki statystycznej oceny parametrów C i n równań empirycznych.

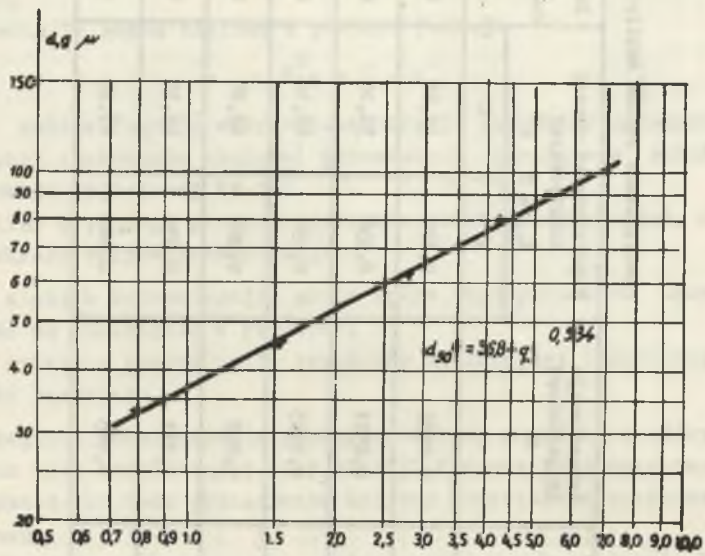
Tablica 1

Zestawienie równań empirycznych $d_{50}^{G} = C \cdot q^{n}$

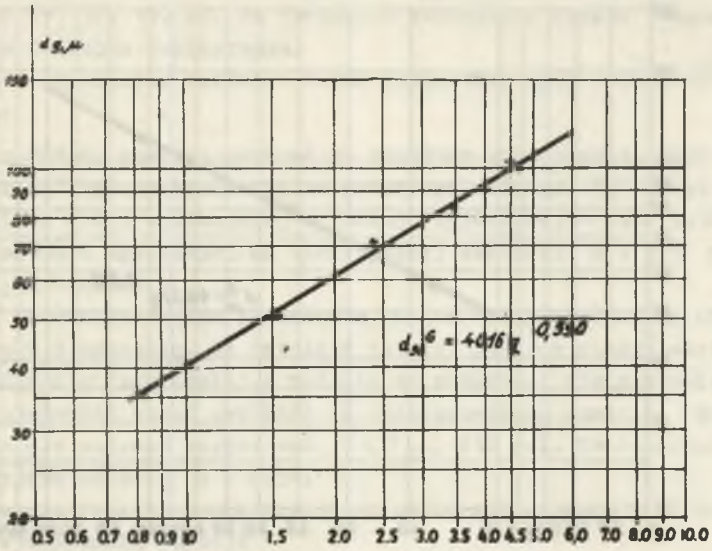
Średnie zagęszczenie zaczynu, g/l ρ_{Σ}	Koncentracja objętościowa % ε	Współczynniki równań empirycznych $d_{50} = C \cdot q^{n}$		Przedziały ufności współczynników równań empirycznych		Średni błąd kwadratowy, charakteryzujący dokładność pomiaru d_{50}, w mikronach
		n	C	n	C	
37	0,0255	0,591	32,91	$0,537 < n < 0,646$	$31,49 < C < 34,39$	1,02
77	0,0531	0,534	36,84	$0,518 < n < 0,550$	$36,18 < C < 37,52$	0,38
102	0,0703	0,590	40,16	$0,517 < n < 0,663$	$36,86 < C < 43,74$	1,51
142	0,098	0,529	42,20	$0,453 < n < 0,605$	$40,04 < C < 44,49$	3,01
175	0,121	0,536	48,37	$0,477 < n < 0,595$	$45,25 < C < 51,64$	3,80
210	0,145	0,483	67,90	$0,446 < n < 0,520$	$65,19 < C < 70,78$	1,75



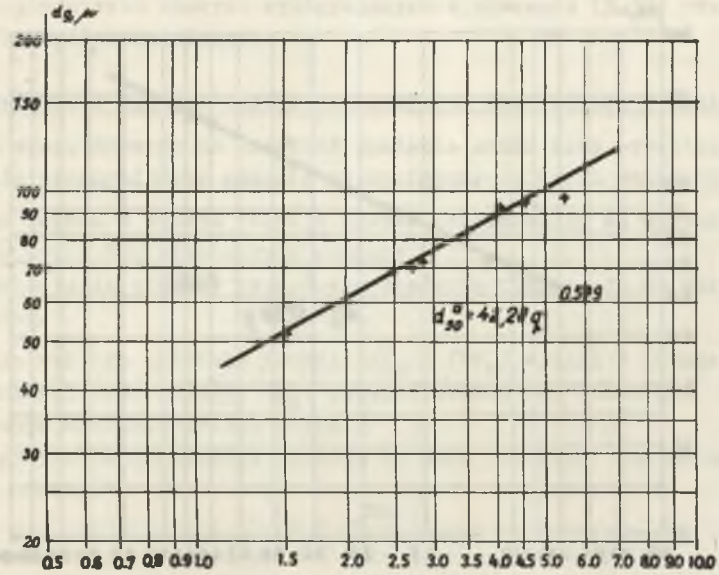
Rys. 15. Funkcja $d_{50}^{G} = f(q)$ dla zagęszczenia β_N = 37 g/l



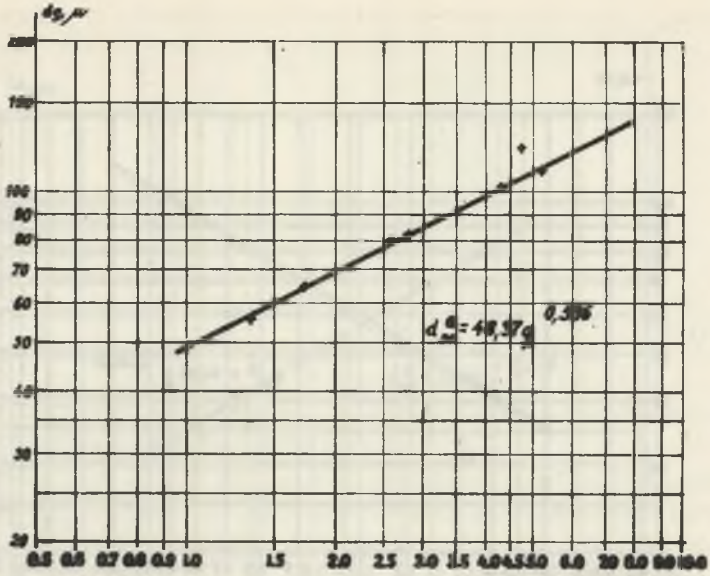
Rys. 16. Funkcja $d_{50}^{G} = f(q)$ dla zagęszczenia β_N = 77 g/l



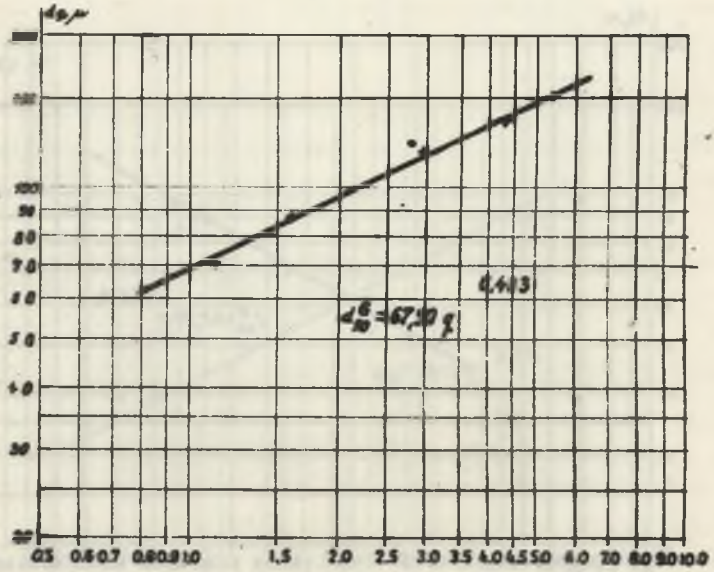
Rys. 17. Funkcja $d_{50}^{G} = f(q)$ dla zagęszczenia β_N = 102 g/l



Rys. 18. Funkcja $d_{50}^{G} = f(q)$ dla zagęszczenia β_N = 142 g/l



Rys. 19. Funkcja $d^G_{50} = f(q)$ dla zagęszczenia β_N = 175 g/l



Rys. 20. Funkcja $d^G_{50} = f(q)$ dla zagęszczenia β_N = 210 g/l

Poszczególne zbiory punktów naniesiono w układzie logarytmicznym na rys. 15, 16 17, 18, 19, 20. Na rysunkach naniesiono proste odpowiadające wyznaczonym funkcjom empirycznym.

Z analizy uzyskanych wartości dwóch parametrów tych równań "C" i "n" wynika, że:

1. Parametr "C" ma rosnącą wartość ze wzrostem koncentracji fazy stałej.
2. Parametr "n" będący wykładnikiem potęgowym zmiennej "q" jest różny od wartości $n = 0,5$ wynikającej z funkcji wyjściowej - wzór 3.10. Odchylenia wartości uzyskanych od teoretycznej wartości $n = 0,5$ nie wykazują regularności.
3. Analiza istotności zmian parametrów C i n przy przedziale ufności wynoszącym 0,9 wykazała, że istnieje istotny związek między wartością C a koncentracją fazy stałej w nadawie do osadnika: nie wykazała natomiast istotności wahań wartości n dla przebiegu funkcji. Analizę tę wykonano dla zakresu zagęszczeń $0 < \beta_N < 210$ g/l. Do dalszych rozważań przyjęto średnią $n = 0,54$.
4. Wprowadzenie funkcji koncentracji do wzoru wyjściowego 3.10 może bazować na wyznaczeniu funkcji

$$C = f\ (\text{koncentracja fazy stałej w nadawie})$$

przy uwzględnieniu stałych występujących w równaniu (3.10) oraz przyjętych w badaniach modelowych.

3.2.2. Wyznaczenie funkcji wpływu koncentracji fazy stałej w zawiesinie

Analiza wzoru Stokesa na prędkość opadania ziarn oraz przebiegu procesu osadzania przemysłowego pozwala na wyciągnięcie dwóch wniosków:

1) istnieje zakres w którym funkcja wpływu koncentracji ma wartość w przybliżeniu stałą lub nieznacznie rosnącą,
2) po przekroczeniu granicy swobodnego opadania funkcja ta ma wartość stale rosnącą.

Przyjęcie takiego podziału funkcji $d_{50}^{G} = f(\beta_N)$ wynika z istnienia granicznej wartości koncentracji β_N, powyżej której nie można już mówić o nieskrępowanym opadaniu zbioru ziarn.
Zgodnie z powyższym założeniem funkcja ta może posiadać postać ogólną:

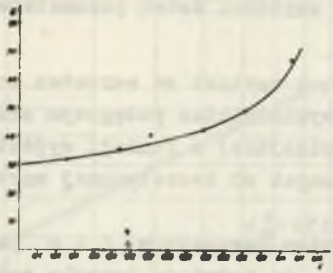
$$y = ae^{bx} \qquad 3.12$$

lub

$$y = \frac{1}{a - bx} \qquad 3.13$$

Funkcja typu 3.13 dla $a = 1$, $b = k$ jest funkcją lepkości względnej - wzór 3.8.

Na rys. 21 naniesiono wartości tych współczynników w zależności od koncentracji fazy stałej w nadawie do osadnika zgodnie z danymi tablicy 1.



Rys. 21. Zależność współczynnika C równań $d_{50} = C_q^n$ od koncentracji objętościowej nadawy ε

Równania empiryczne wyznaczone zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 2 posiadają następującą postać:

$$C = 27{,}34 \quad e^{5{,}421\varepsilon} = K\, f(\varepsilon) \qquad 3.15$$

$$C = \frac{1}{3{,}48\times10^{-2} - 1{,}19 \cdot 10^{-1}\varepsilon} = K\, f(\varepsilon) \qquad 3.16$$

Ze względu na ogólną postać funkcji lepkości - koncentracji przedstawionej we wzorze 3.10 typu

$$f(\varepsilon) = \sqrt{\frac{1}{1 - K\varepsilon}}$$

przeprowadzono również aproksymację wg powyższej postaci. Uzyskano funkcję empiryczną

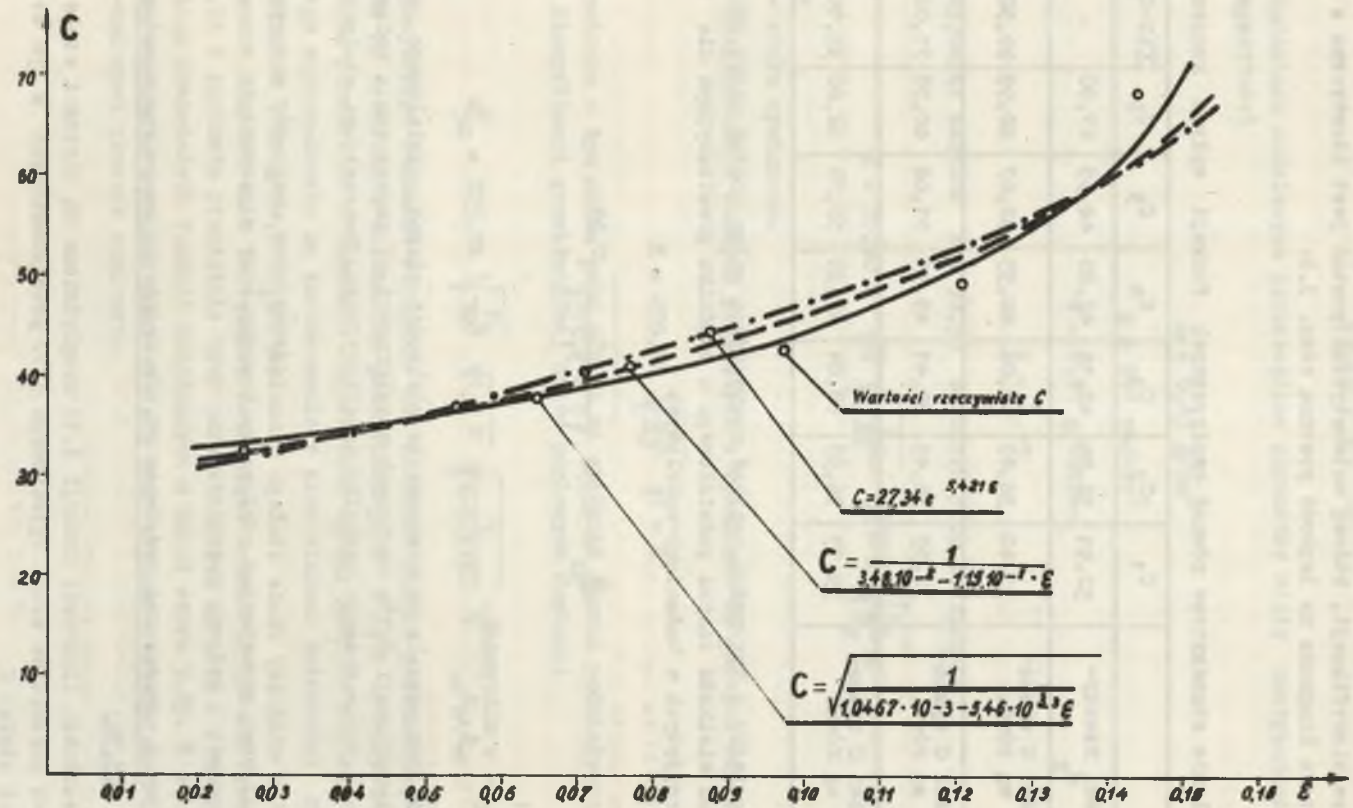
$$C = \sqrt{\frac{1}{1.0467 \cdot 10^{-3} - 5{,}46 \cdot 10^{-3}\varepsilon}} = K \cdot f(\varepsilon) \qquad 3.17$$

Na rys. 22 naniesiono wartości rzeczywiste stałej C oraz przebieg funkcji empirycznych 3.15, 3.16, 3.17 wyznaczonych analitycznie. Jak widać z rys. 17 najlepiej aproksymuje wartości stałej C funkcja 3.17.

W tablicy 2 zestawiono odchylenia standartowe wartości rzeczywistych C i wartości wyznaczonych wymienionymi funkcjami które potwierdzają wniosek o najlepszej aproksymacji funkcji 3.17.

Funkcję 3.17 można zapisać inaczej

$$C = K\, f(\varepsilon) = 30{,}90 \sqrt{\frac{1}{1 - 5{,}215\varepsilon}} \qquad 3.18$$



Rys. 22. Graficzna postać równań empirycznych 3.15, 3.16 i 3.17

Uzyskano w ten sposób funkcję wpływu koncentracji fazy stałej na przebieg procesu klasyfikacji, której matematyczna postać jest identyczna z postacią wzoru Binghama na lepkość pozorną równ. 3.8.

Tablica 2

Odchylenie standartowe równań empirycznych funkcji wpływu koncentracji

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$\Sigma(C-C_R)^2$	σ
Wartości rzeczywiste C_R	32,91	36,84	40,16	42,20	48,55	67,90	–	–
Wartości C wyznaczone wg równ. 3.15	31,40	36,49	40,06	48,55	52,67	60,99	99,305	4,45
Wartości C wyznaczone wg równ. 3.16	32,53	36,45	39,41	45,31	51,68	60,78	71,022	3,77
Wartości C wyznaczone wg równ. 3.17	33,19	36,35	38,84	42,35	50,79	62,60	35,191	2,65

W związku z tym można napisać następującą pełną postać wzoru empirycznego na wielkość ziarna podziałowego w osadniku grawitacyjnym dla warunków przyjętych w badaniach modelowych

$$d_{50}^{G} = 30,90 \sqrt{\frac{1}{1 - 5,215\varepsilon}}\, q^{0,54} \qquad 3.19$$

gdzie:

d_{50}^{G} – w mikronach,

q – m^3/m^2h.

Wzór ten pozwala na wyznaczenie wielkości ziarna podziałowego w procesie klasyfikacji mułów węglowych w zależności od zagęszczenia nadawy i obciążenia jednostkowego osadnika grawitacyjnego. Parametrami stałymi badań były:

- ciężar właściwy ciała stałego wynoszący $\varrho_z = 1,45\ g/cm^3$, rozdział ilościowy $R = 0,15$. Zakres zagęszczeń nadawy: od 0 do 210 g/l, co daje wartości ε od 0 do 0,145.

3.2.3. Uogólnienie równania 3.19 dla szerszego zakresu zmiennych równania (3.10)

W wartości liczbowej funkcji 3.18 uwzględnione są wartości stałe pozostałych parametrów wzoru wyjściowego 3.10 przedstawionych w tym wzorze w postaci stałej K

$$K = \sqrt{\frac{18\ \rho_o}{g\,\Delta\varrho}}\ \sqrt{\frac{K_d\ (1-R)}{K_F}} \qquad 3.20$$

W badaniach modelowych poszczególne parametry miały następujące przeciętne wartości

$$\Delta\varrho = 0{,}45\ g/cm^3$$

$$g = 981\ cm/sec^2$$

$$\eta = 0{,}01\ g/cm.sec$$

$$R = 0{,}15$$

Przyjmując wartość $K = 30{,}90$ ze wzoru 3.18 otrzymamy:

$$K = 30{,}90 = \sqrt{18}\ \sqrt{\frac{\rho_o}{g\Delta\varrho}}\ \sqrt{1-R}\ \sqrt{\frac{K_d}{K_F}}\ M \qquad 3.21$$

gdzie:

M - stała wymiarowa.

Po uwzględnieniu stałych przyjętych w badaniach modelowych otrzymamy

$$K = 225{,}74\ \sqrt{\frac{\rho_o}{\Delta\varrho}}\ \sqrt{1-R} \qquad 3.22$$

W związku z tym można wzór ogólny na wielkość ziarna podziałowego w procesie klasyfikacji grawitacyjnej mułów węglowych napisać:

$$d_{50}^{G} = 225{,}74\ \sqrt{\frac{\rho_o}{\Delta\varrho}}\ \sqrt{1-R}\ \sqrt{\frac{1}{1-5{,}215\delta}}\ q^{0{,}54} \qquad 3.23$$

Z powyższego równania otrzymuje się wielkość ziarna podziałowego w mikronach po wstawieniu obciążenia jednostkowego w m^3/m^2h i wszystkich pozostałych parametrów w układzie c.g.s. Wzór ogólny 3.23 ze względu na sposób jego wyprowadzenia ma zastosowanie w przedziałach zmienności stałych przyjętych w badaniach modelowych.

Znaczne rozszerzenie tego zakresu wymagałoby sprawdzenia przebiegu funkcji 3.23 w szerokim przedziale tych parametrów jak również stwierdzenia przebiegu pozostałych funkcji wchodzących w skład wzoru 3.23. W związku z tym zastosowanie wzoru ogranicza się do zagadnień związanych z obiegami wodno-mułowymi płuczek węglowych.

3.3. Zastosowanie wzoru empirycznego 3.23 do klasyfikacji "gruboziarnistej" stosowanej w obiegu wodno-mułowym

We wszystkich obiegach wodno-mułowych, których systematykę omówiono w rozdziale 1 występuje proces klasyfikacji materiałów gruboziarnistych tzw. klasyfikacja kontrolna - przed klarowaniem surowych zawiesin węglowych lub też przed ich wzbogacaniem.

Dla sprawdzenia możliwości zastosowania wyprowadzonych wzorów empirycznych do wyznaczenia parametrów tej klasyfikacji przeprowadzono serię doświadczeń na instalacji modelowej dla tego procesu klasyfikacji przedstawionej na rys. 12.

Parametrami różniącymi ten cykl doświadczeń od badań modelowych omówionych w rozdziale 3.2 były:

- zakres obciążeń oraz
- skład ziarnowy części stałych.

W tablicy 3 zestawione są wyniki dwóch serii doświadczeń przeprowadzonych przy zagęszczeniach około 60 i 120 g/l oraz błędy względne uzyskanych wyników w stosunku do wielkości ziarna podziałowego wyznaczonej wzorem empirycznym 3.18. Jak widać błędy te wahają się w granicach 1 do 13%. W tablicy przedstawiono również odchylenia standartowe wyznaczone dla uzyskanych wyników. Wynika stąd, że funkcję 3.23 można również stosować do wyznaczenia wielkości ziarna podziałowego na I stopniu regeneracji wody obiegowej w obiegu wodno-mułowym zakładu z dokładnością wystarczającą dla celów praktycznych.

Tablica 3

Zestawienie wyników badań klasyfikacji "gruboziarnistej"

Parametry doświadczeń		Wyniki pomiarów					Odchylenie standartowe
I seria - β_N = 60 g/l	Obciążenie jednostkowe m^3/m^2h	10	23,2	55,2	82,8	108,8	32,4
	Rzeczywista wielkość ziarna podziałowego μ	120	220	314	410	490	
	Wielkość ziarna podziałowego wyznaczona wzorem 3.24 μ	121	190	304,0	379	440,0	
	Błąd względny wyznaczenia wielkości ziarna podziałowego %	0,8%	13,63	3,18	7,56	10,20	
II seria - β_N = 110 g/l	Obciążenie jednostkowe m^3/m^2h		22,8	34,0		123,3	29,1
	Wielkość ziarna podziałowego μ		240	290		545	
	Wielkość ziarna podziałowego wyznaczona wzorem 3.24 μ		209	259		520	
	Błąd względny wyznaczenia wielkości ziarna %		12,91	10,68		4,58	

4. PROCES ROZDZIAŁU FAZ: STAŁA-STAŁA W OŚRODKU WODNYM - PRZY WYKORZYSTANIU SIŁY ODŚRODKOWEJ I PRAKTYCZNE WYZNACZENIE PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW TEGO PROCESU

Z równania Stokesa przedstawionego w rozdziale 3 - wzór 3.3 - wynika, że prędkość opadania ziarna jest proporcjonalna do siły ją wywołującej. W przypadku klasyfikacji grawitacyjnej siła ta jest stała i wynosi masa x przyspieszenie ziemskie. Przy wprowadzeniu siły odśrodkowej można uzyskiwać znaczne zmiany prędkości opadania ziarna przez wprowadzenie wartości masa x przyspieszenie odśrodkowe. Daje to możliwość bardziej intensywnego prowadzenia procesu klasyfikacji.

Rozważania teoretyczne przeprowadzone według metody podanej dla prędkości opadania ziarna w polu grawitacyjnym pozwalają na wyznaczenia wzoru na prędkość opadania ziarna w polu siły odśrodkowej.

Przez porównanie tej prędkości z prędkością radialną przepływu cieczy w hydrocyklonie uzyskuje się wzoru ogólną postać na teoretyczną wielkość ziarna podziałowego w hydrocyklonie. Jednakże uzyskane tą drogą wzory jak również wzory empiryczne dają wyniki nieraz znacznie odbiegające od wartości praktycznych, przede wszystkim ze względu na przyjęcie różnych funkcji cząstkowych dla takich parametrów charakterystycznych jak: wydajność hydrocyklonu, zagęszczenie jego produktów, rozdział ilościowy itp. [21].

Doprowadziło to do powstania dużej liczby wzorów empirycznych na wartość parametru rozdziału d_{50}^{H} o ograniczonej praktycznej wartości.

W związku z tym, w niniejszym opracowaniu podano wyznaczone doświadczalnie nomogramy dla typowych hydrocyklonów stosowanych w obiegach wodno-mułowych w układach przedstawionych na schemacie modelowym obiegu -rys. 8. Jest to powszechnie stosowana metoda dla wyznaczenia zakresu wykorzystania hydrocyklonów w procesach wodno-mułowych. Uzyskano w ten sposób materiał wyjściowy do analizy porównawczej oraz dane praktyczne dla prac projektowych i regulacji ruchowej hydrocyklonów. W opracowaniu zbiorczym wyników wykorzystano również bogaty materiał doświadczalny badań wykonanych przez A. Battaglię i J. Olszowskiego [13] oraz wyniki badań hydrocyklonów o średnicy 440 mm wykonane przez Zakład Badań Maszyn B.P. Separator [29].

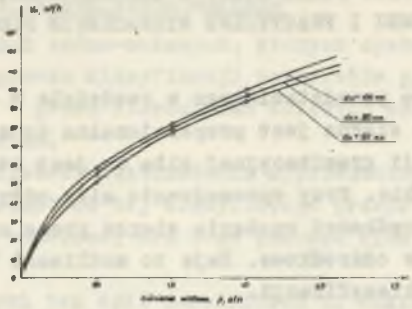
Pełny cykl badań hydrocyklonu [21, 24] potrzebny dla wykonania omówionych wyżej nomogramów wymaga wyznaczenia wydajności całkowitej hydrocyklonu oraz technologicznych parametrów jego działania. Zestawienie wyników takiego cyklu badań podano niżej dla hydrocyklonu o średnicy 540 mm.

4.1. Wydajność całkowita hydrocyklonu

Całkowita wydajność hydrocyklonu jest funkcją jego parametrów konstrukcyjnych oraz ciśnienia wlotowego. Dla stałych parametrów konstrukcyjnych wydajność ta jest funkcją ciśnienia wlotowego o ogólnej postaci:

$$V_N = K \sqrt{p}$$

Przebieg tej funkcji dla hydrocyklonu 540 mm przedstawiono na rys. 23.



Rys. 23. Całkowita wydajność hydrocyklonu 540 jako funkcja ciśnienia wlotowego

4.2. Parametry działania hydrocyklonu

Z projektowanego i ruchowego punktu widzenia najważniejszymi parametrami hydrocyklonu są:

- zagęszczenie jego produktów,
- ziarno podziałowe,
- objętościowy wychód produktu dolnego (rozdział ilościowy produktów hydrocyklonu),
- uzysk części stałych w produkcie dolnym.

Zagęszczenie produktów hydrocyklonu jako funkcja ciśnienia wlotowego i zagęszczenia nadawy

Między zagęszczeniem produktów hydrocyklonu a ciśnieniem pod jakim wyprowadza się nadawę istnieje ścisła zależność. Zależność ta występuje z uwagi na ścisłe powiązanie dwóch czynników: rozdziału ilościowego cieczy (wody) w hydrocyklonie i ciśnienia wlotowego [5].

Zagęszczenie produktów hydrocyklonu zależy również od zagęszczenia nadawy do hydrocyklonu.

Wyniki badań wpływu tych dwóch czynników tj. ciśnienia wlotowego i zagęszczenia nadawy na zagęszczenie produktów hydrocyklonu zestawione są na rysunkach 24 - 31.

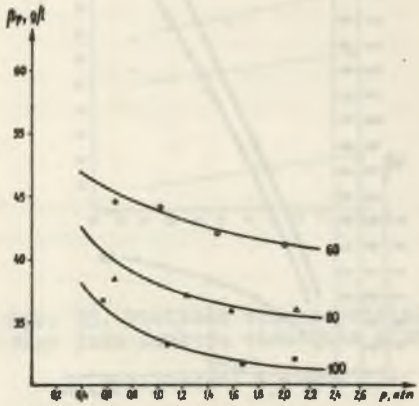
Ziarno podziałowe hydrocyklonu jako funkcja ciśnienia wlotowego i zagęszczenia nadawy

Krzywe rozdziału wykreślono oddzielnie dla poszczególnych wartości ciśnienia wlotowego oraz dla danej średnicy otworu wylewowego.

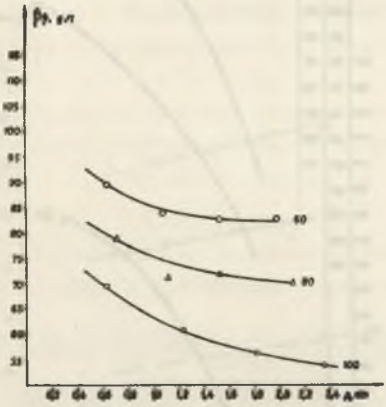
Na podstawie krzywych rozdziału wyznaczono rzeczywistą wielkość ziarna podziałowego hydrocyklonu.

Zestawienie wyników badań modelowych tego parametru działania hydrocyklonu podane jest na rys. 32 do 35.

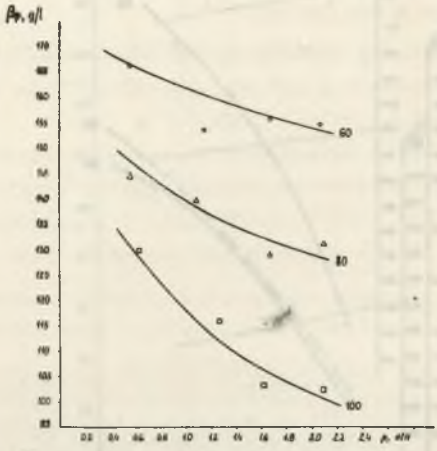
Rys. 24. Zagęszczenie przelewu hydrocyklonu 540 jako funkcja ciśnienia wlotowego β_N-63,2 g/l



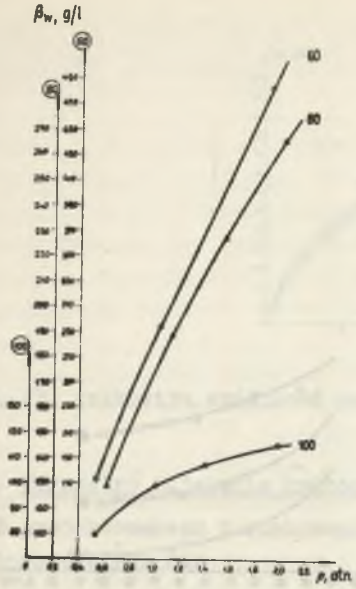
Rys. 25. Zagęszczenie przelewu hydrocyklonu 540 jako funkcja ciśnienia wlotowego β_N-93 g/l



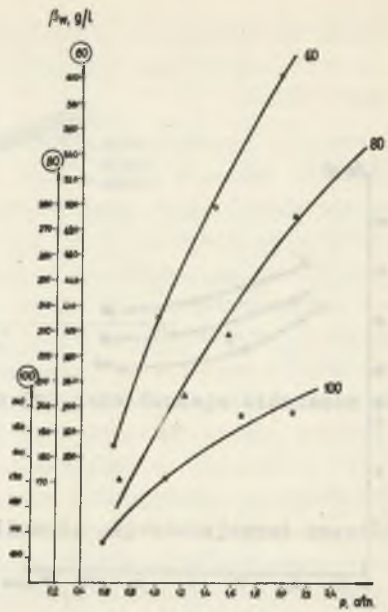
Rys. 26. Zagęszczenie przelewu hydrocyklonu 540 jako funkcja ciśnienia wlotowego β_N-173,7 g/l



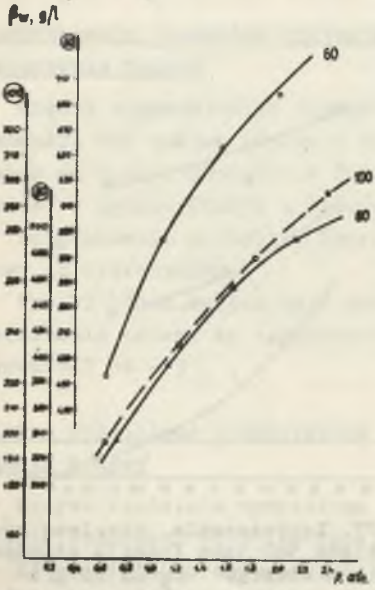
Rys. 27. Zagęszczenie przelewu hydrocyklonu 540 jako funkcja ciśnienia wlotowego β_N-231,5 g/l



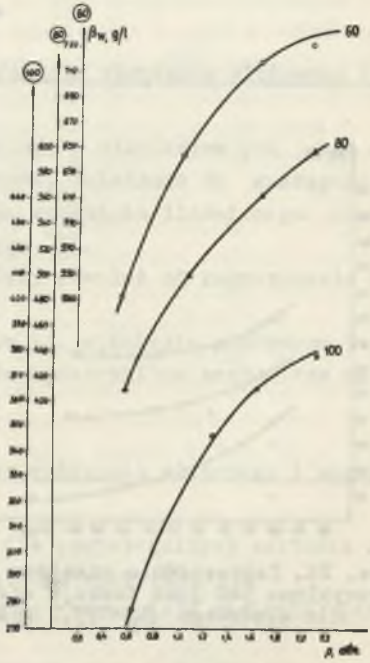
Rys. 28. Zagęszczenie wylewu hydrocyklonu 540 jako funkcja ciśnienia wlotowego β_N-63,2 g/l



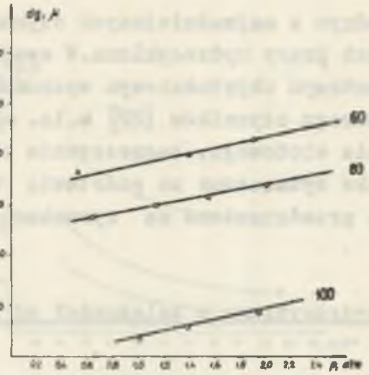
Rys. 29. Zagęszczenie wylewu hydrocyklonu 540 jako funkcja ciśnienia wlotowego β_N-93 g/l



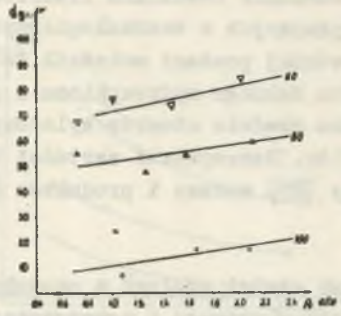
Rys. 30. Zagęszczenie wylewu hydrocyklonu 540 jako funkcja ciśnienia wlotowego β_N-173,7 g/l



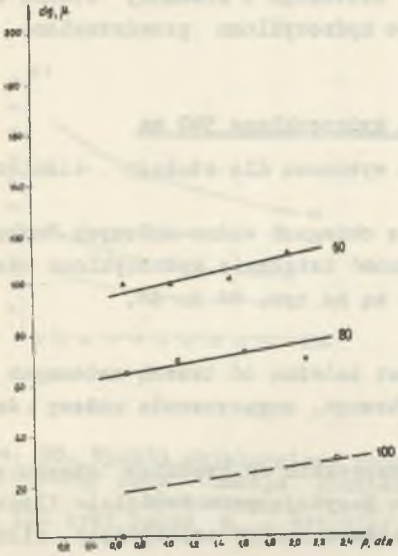
Rys. 31. Zagęszczenie wylewu hydrocyklonu 540 jako funkcja ciśnienia wlotowego β_N-231,5 g/l



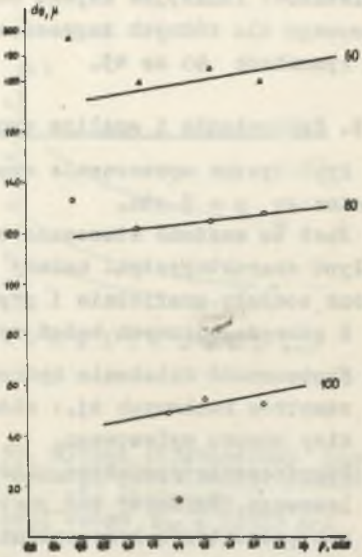
Rys. 32. Wielkość ziarna podziałowego jako funkcja ciśnienia wlotowego
I cykl badań β_N - 63,2 g/l



Rys. 33. Wielkość ziarna podziałowego jako funkcja ciśnienia wlotowego
II cykl badań β_N - 93 g/l



Rys. 34. Wielkość ziarna podziałowego jako funkcja ciśnienia wlotowego
III cykl badań β_N - 173,7 g/l



Rys. 35. Wielkość ziarna podziałowego jako funkcja ciśnienia wlotowego
IV cykl badań β_N - 231,5 g/l

Wychód objętościowy produktu dolnego jako funkcja ciśnienia wlotowego i zagęszczenia nadawy

Wskaźnik rozdziału ilościowego jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o technologicznych parametrach pracy hydrocyklonu. W swej najprostszej postaci wskaźnik ten jest procentowym objętościowym wychodem produktu dolnego hydrocyklonu i zależy od szeregu czynników [22] m.in. od stosunku średnic otworów wylotowych, ciśnienia wlotowego, zagęszczenia nadawy itp. Rzeczywiste wartości tego wskaźnika wyznaczone na podstawie analizy [25] nadawy i produktów hydrocyklonu przedstawiono na rysunkach 36-39.

Uzysk części stałych w produkcie dolnym hydrocyklonu w zależności od ciśnienia wlotowego i zagęszczenia nadawy

Wskaźnik uzysku części stałych w produkcie hydrocyklonu decyduje o stopniu ekstrakcji mułów z wód obiegowych, a tym samym o możliwościach zamykania obiegu oraz o bilansie obiegu wodno-mułowego w poszczególnych gałęziach.

Uzysk części stałych obliczono na podstawie wzoru:

$$\eta_H = \frac{\rho_W}{\rho_N} j_W$$

Zależności funkcyjne uzysku od ciśnienia wlotowego i średnicy otworu wylewowego dla różnych zagęszczeń nadawy do hydrocyklonu przedstawione są na rysunkach 40 do 43.

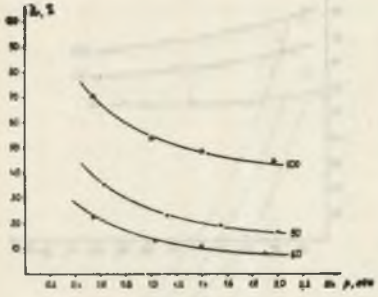
4.3. Zestawienie i analiza wyników badań hydrocyklonu 540 mm

Syntetyczne opracowanie wyników badań wykonano dla stałego ciśnienia wlotowego p = 2 atm.

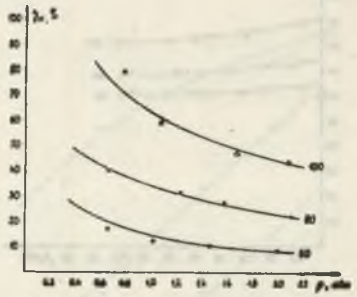
Jest to wartość stosowana w praktyce w obiegach wodno-mułowych. Funkcje wpływu charakterystyki nadawy na skuteczność działania hydrocyklonu wyznaczone zostały graficznie i przedstawione są na rys. 44 do 48.

Z przeprowadzonych badań wynika, że:

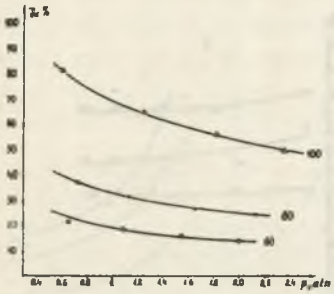
1. Skuteczność działania hydrocyklonu jest zależna od trzech zmiennych parametrów ruchowych tj.: ciśnienia wlotowego, zagęszczenia nadawy i średnicy otworu wylewowego.
2. Zagęszczenie produktów zależy przede wszystkim od średnicy otworu wylewowego. Parametr ten jest czynnikiem decydującym o rozdziale ilościowym produktów w hydrocyklonie. Zagęszczenie nadawy szczególnie silnie oddziaływuje na zagęszczenie przelewu, które bardzo szybko rośnie ze wzrostem zagęszczenia nadawy. Do wartości zagęszczenia nadawy rzędu 120 g/l przyrost zagęszczenia przelewu jest łagodniejszy. Powyżej tej wartości zagęszczenie przelewu rośnie bardzo gwałtownie. Ciśnienie wloto-



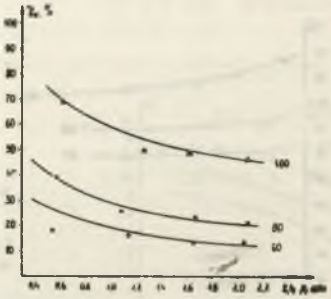
Rys. 36. Wychód objętościowy produktu dolnego jako funkcja ciśnienia wlotowego
I cykl badań β_N - 63,2 g/l



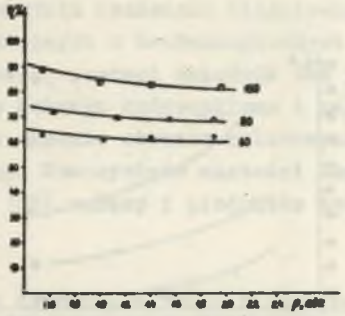
Rys. 37. Wychód objętościowy produktu dolnego jako funkcja ciśnienia wlotowego
II cykl badań β_N - 93 g/l



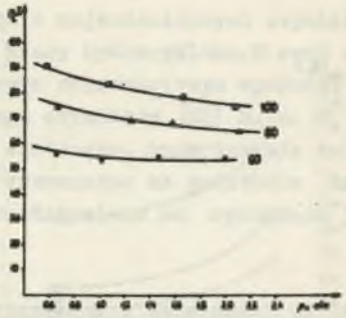
Rys. 38. Wychód objętościowy produktu dolnego jako funkcja ciśnienia wlotowego
III cykl badań β_N - 173,7 g/l



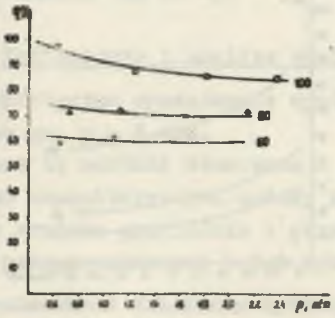
Rys. 39. Wychód objętościowy produktu dolnego jako funkcja ciśnienia wlotowego
IV cykl badań β_N - 231,5 g/l



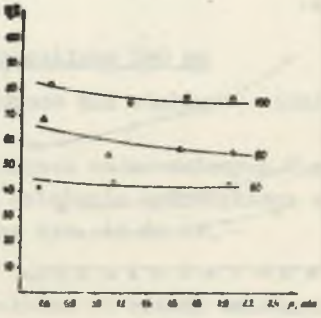
Rys. 40. Uzysk części stałych w produkcie dolnym jako funkcja ciśnienia wlotowego
I cykl badań β_N - 63,2 g/l



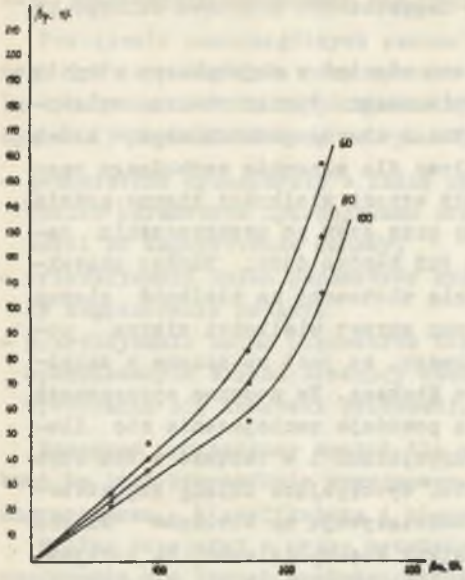
Rys. 41. Uzysk części stałych w produkcie dolnym jako funkcja ciśnienia wlotowego
II cykl badań β_N - 93 g/l



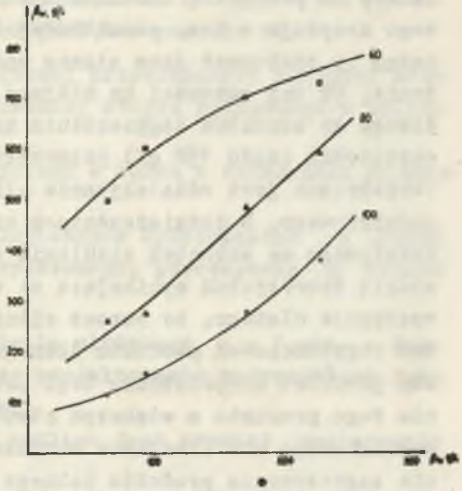
Rys. 42. Uzysk części stałych w produkcie dolnym jako funkcja ciśnienia wlotowego
III cykl badań β_N - 173,3 g/l



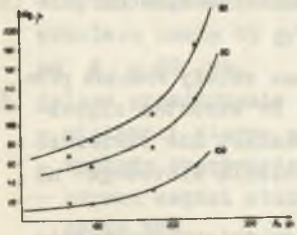
Rys. 43. Uzysk części stałych w produkcie dolnym jako funkcja ciśnienia wlotowego
IV cykl badań β_N - 231,5 g/l



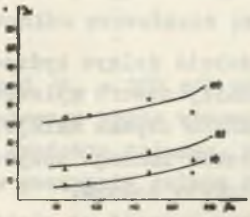
Rys. 44. Wpływ ciśnienia wlotowego na zagęszczenie przelewu hydrocyklonu dla p = 2 atn



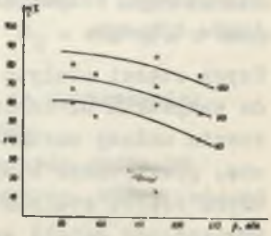
Rys. 45. Wpływ ciśnienia wlotowego na zagęszczenie wylewu hydrocyklonu dla p = 2 atn



Rys. 46. Wpływ zagęszczenia nadawy na wielkość ziarna podziałowego hydrocyklonu dla p = 2 atn



Rys. 47. Wpływ zagęszczenia na wychód objętościowy produktu dolnego dla p = 2 atn



Rys. 48. Wpływ zagęszczenia nadawy na uzysk części stałych w produkcie dolnym hydrocyklonu dla p=2 atn

we posiada natomiast większy wpływ na zagęszczenie produktu dolnego hydrocyklonu.

3. Wartość ziarna podziałowego hydrocyklonu również w największym stopniu zależy od przyjętej średnicy otworu wylewowego. Wymiar otworu wylewowego decyduje o tzw. początkowej wielkości ziarna podziałowego, którą można by traktować jako ziarno podziałowe dla warunków swobodnego opadania. Od tej wartości ma miejsce stały wzrost wielkości ziarna podziałowego ze wzrostem zagęszczenia nadawy przy czym po przekroczeniu zagęszczenia rzędu 150 g/l przyrosty są już bardzo duże. Bardzo charakterystyczne jest oddziaływanie ciśnienia wlotowego na wielkość ziarna podziałowego. W doświadczeniach uzyskano wzrost wielkości ziarna podziałowego ze wzrostem ciśnienia wlotowego, co jest sprzeczne z zależnością teoretyczną wynikającą ze wzoru Stokesa. Ta pozorna sprzeczność występuje dlatego, że wzrost ciśnienia powoduje zmniejszenie się ilości objętościowej produktu dolnego hydrocyklonu i w związku z tym szybszy przyrost zagęszczenia tego produktu. Występujące zmiany zagęszczenia tego produktu w większym stopniu oddziaływują na wielkość ziarna podziałowego niż ciśnienie wlotowe. Należy się spodziewać, że utrzymanie zagęszczenia produktu dolnego hydrocyklonu na stałym poziomie - niezależnie od zmian zagęszczenia nadawy - co możliwe jest przez odpowiednią regulację i dobór średnicy otworu wylewowego, umożliwi uzyskanie znanych teoretycznie zależności funkcyjnych między wielkością ziarna podziałowego a ciśnieniem wlotowym do hydrocyklonu - $d_{50}^{H} = k \cdot p^{-0,25}$.

4. Wychód produktu dolnego hydrocyklonu jest przede wszystkim funkcją średnicy otworu wylewowego. Dla danej średnicy tego otworu, objętościowy wychód produktu dolnego rośnie ze wzrostem zagęszczenia nadawy. Przyrost ten jest znaczny dopiero po przekroczeniu wartości 100 g/l zagęszczenia nadawy. Wzrost ciśnienia wlotowego powoduje obniżenie wychodu produktu dolnego.

5. Uzysk części stałych w produkcie dolnym hydrocyklonu zależy również przede wszystkim od doboru średnicy otworu wylewowego. Ze wzrostem zagęszczenia nadawy wartość wskaźnika uzysku maleje, natomiast nie stwierdza się, praktycznie biorąc, prawie żadnego wpływu ciśnienia wlotowego na uzysk części stałych w produkcie dolnym.

6. Stwierdzono ścisłą wzajemną zależność od siebie wszystkich parametrów działania hydrocyklonu, co jest bardzo ważne z punktu widzenia doboru hydrocyklonu dla określonego zadania w fazie projektowej jak również jego regulacji w warunkach ruchowych. Faworyzowanie jednego z parametrów odbije się ujemnie na pozostałych parametrach. I tak na przykład dążenie do maksymalnego zagęszczenia produktu dolnego spowoduje jednocześnie znaczny wzrost wielkości ziarna podziałowego, podwyższenie zagęszczenia przelewu oraz spadek uzysku części stałych w produkcie dolnym.

4.4. Wyznaczenie nomogramów dla hydrocyklonów D = 540 i 280 mm

Powiązanie poszczególnych parametrów działania hydrocyklonu wymaga łącznego ich rozpatrywania przy wyborze optymalnych warunków pracy. W tym celu opracowano metodę na podstawie której sporządzono nomogram dla hydrocyklonu 540 przedstawiony na rys. 49. Nomogram ten pozwala na:

- jednoczesne wyznaczenie w fazie projektowej przybliżonych wartości wszystkich parametrów hydrocyklonu oraz średnicy otworu wylewowego w zależności od zagęszczenia nadawy,
- przewidywanie zmian parametrów hydrocyklonu w ruchu w zależności od zmiany zagęszczenia nadawy,
- przewidywanie zmian parametrów technologicznych hydrocyklonu w ruchu spowodowanych zmianą średnicy otworu wylewowego, powstającej w wyniku wycierania się końcówki wylewowej.

Nomogram sporządzony został dla ciśnienia wlotowego p = 2 atm. Wartość ta jest powszechnie przyjmowana przy projektowaniu hydrocyklonu jako zagęszczacza - klasyfikatora i klarownika.

Według przyjętej w pracy metodologii możliwe jest również wyznaczenie nomogramów dla innych wartości ciśnień.

Na rys. 49 podano również przykład korzystania z nomogramu: dla wody obiegowej o zagęszczeniu 100 g/l należy zastosować hydrocyklon D=540 tak, aby uzyskać jako produkt dolny muł o zagęszczeniu około 500 g/l przeznaczony do odwadniania na filtrze.

Tok postępowania jest następujący:

1) przecięcie prostych β_W - 500 g/l i β_N - 100 g/l pozwala na wyznaczenie średnicy otworu wylewowego, która w tym przypadku wynosi d_w = 65 mm. W praktyce przyjmuje się produkowaną końcówkę o średnicy 60 mm,
2) dla tej wartości średnicy otworu wylewowego uzyskujemy zagęszczenie przelewu około 45 g/l w wyniku przecięcia prostej β_N = 100 g/l z krzywą d_w = 60 mm,
3) dalsze przedłużenie prostej β_N = 100 g/l pozwala na wyznaczenie:
   - wielkości ziarna podziałowego która wynosi ok. 85μ,
   - wychodu objętościowego produktu dolnego, który wynosi około 8%,
   - uzysku części stałych w produkcie dolnym hydrocyklonu, który wynosi około 58%.

Analiza wyników badań hydrocyklonu 282 mm [3] wykonana wg tej samej metody, przedstawionej w rozdziale 4.1.3 oraz 4.1.4 pozwoliła na opracowanie nomogramu dla hydrocyklonu o średnicy 282 mm. Nomogram ten przedstawiony jest na rys. 50.

4.5. Porównanie technologicznych charakterystyk pracy hydrocyklonów na podstawie sporządzonych nomogramów

Analiza porównawcza obu wymienionych hydrocyklonów na podstawie nomogramów ich charakterystyki technologicznej nasuwa następujące spostrzeżenia:

1. Istnieje możliwość syntetycznego ujęcia pełnej charakterystyki działania hydrocyklonu przy pomocy jednego nomogramu sporządzonego dla danego ciśnienia wlotowego, stałego ciężaru właściwego części stałych i określonego składu ziarnowego. W obu analizowanych tu przypadkach zarówno przeciętny ciężar właściwy części stałych jak i ich skład ziarnowy posiadają wartości zbliżone do spotykanych w warunkach przemysłowych,co daje możliwość praktycznego wykorzystania tych nomogramów. Ciśnienie wlotowe, dla którego sporządzono wyżej wymienione nomogramy, posiada wartość stosowaną dla hydrocyklonów zagęszczających w obiegach wodnomułowych zakładów przeróbczych,

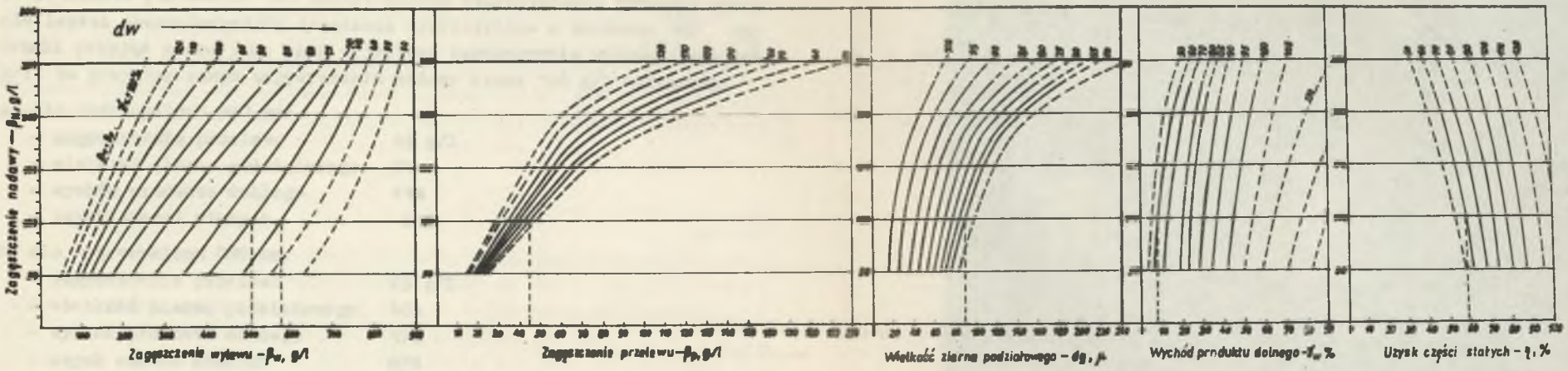
2. Poszczególne zespoły krzywych przedstawione na nomogramach mają taką samą postać, co wskazuje na to, że posiadają te same równania ogólne a różnią się jedynie wartościami współczynników empirycznych.Współczynniki te są przede wszystkim funkcją średnicy hydrocyklonu oraz średnic jego otworów wylotowych i przy stałym ciśnieniu wlotowym decydują o charakterystyce technologicznej hydrocyklonu. Wniosek ten można uogólnić na hydrocyklony o dowolnej średnicy części cylindrycznej.

3. Z przedstawionych wykresów widać decydujący wpływ średnicy otworu wylewowego hydrocyklonu na jego charakterystykę technologiczną. Można np. wyeliminować wpływ zmiany zagęszczenia nadawy na parametry działania hydrocyklonu. Jeżeli dla założonego z góry zagęszczenia produktu dolnego rzędu 500 g/l przy zagęszczeniu nadawy około 100 g/l ustalimy wielkość otworu wylewowego około 65 mm, to otrzymamy orientacyjne wartości pozostałych parametrów dla hydrocyklonu 540 mm:

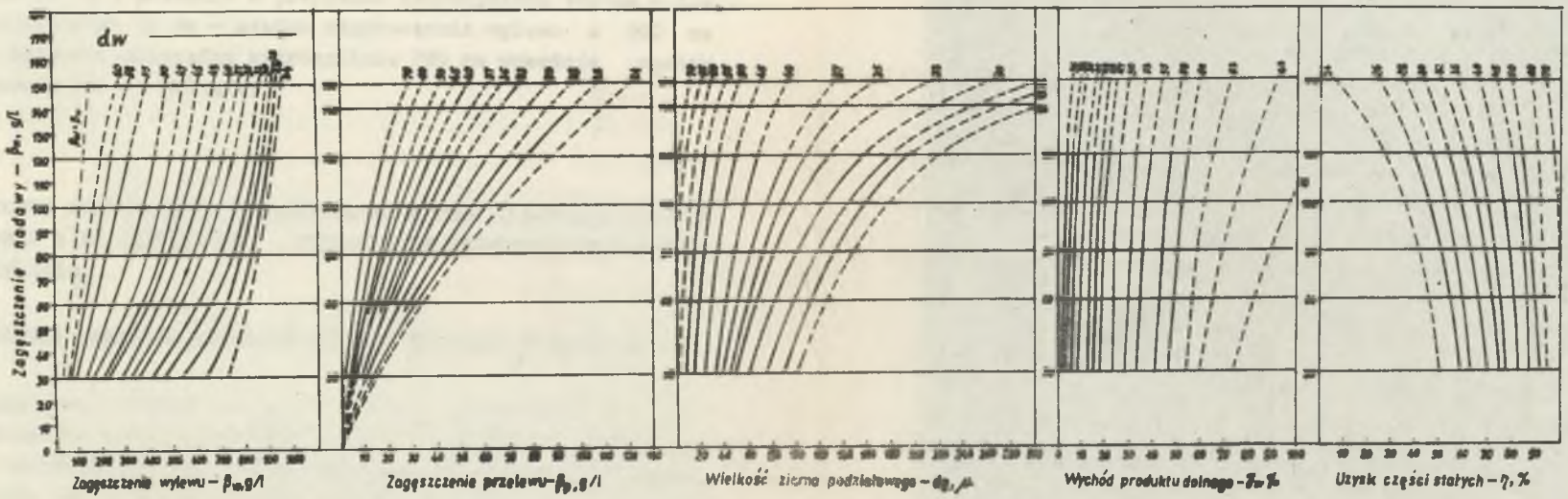
   - wielkość ziarna podziałowego 84μ
   - wychód produktu dolnego 11%
   - uzysk części stałych 61%
   - zagęszczenie przelewu 43 g/l

   Jeżeli teraz, w wyniku pewnych zmian powstałych w warunkach ruchowych, zagęszczenie nadawy wzrasta do np. 150 g/l to przez zmianę średnicy otworu wylewowego do wartości około 73 mm możliwe jest uzyskanie zagęszczenia produktu dolnego rzędu 500 g/l przy następujących wartościach pozostałych parametrów:

   - wielkość ziarna podziałowego 88μ
   - wychodu produktu dolnego 17%
   - uzysku części stałych 61%
   - zagęszczenie przelewu 61 g/l



Rys. 49. Nomogram dla wyznaczania parametrów technologicznych hydrocyklonu 540 mm, ciśnienie wlotowe p = 2 atn



Rys. 50. Nomogram dla wyznaczania parametrów technologicznych hydrocyklonu 282 mm, ciśnienie wlotowe p = 2 atn

Można przyjąć, że praktycznie biorąc poza zagęszczeniem przelewu nie stwierdza się istotnych zmian pozostałych parametrów.

4. Bezpośrednie porównanie obu analizowanych hydrocyklonów wykazuje wyraźnie lepszą charakterystykę działania hydrocyklonu o średnicy 282 mm. Jeżeli przyjąć znowu jako bazę wyjściową zagęszczenie wylewu rzędu 500 g/l, to przy tym samym zagęszczeniu nadawy rzędu 100 g/l otrzymamy:

a) dla hydrocyklonu 540 mm:
- zagęszczenie przelewu 43 g/l
- wielkość ziarna podziałowego 84μ
- wychód produktu dolnego 11%
- uzysk części stałych 61%

b) dla hydrocyklonu 280 mm:
- zagęszczenie przelewu 25 g/l
- wielkość ziarna podziałowego 40μ
- wychód produktu dolnego 17%
- uzysk części stałych 83%

Przedstawione wyżej różnice posiadają duże znaczenie dla samego procesu regeneracji wody obiegowej.

Z drugiej jednakże strony stwierdza się większą wrażliwość hydrocyklonu 280 mm na zmianę zagęszczenia nadawy i tak np. zmiana zagęszczenia nadawy ze 100 g/l na 50 g/l powoduje w przypadku hydrocyklonu 540 mm - dla średnicy otworu wylewowego 65 mm - spadek zagęszczenia wylewu z 500 na 400 g/l. Ta sama zmiana w przypadku hydrocyklonu 280 mm powoduje spadek zagęszczenia wylewu z 500 na 300 g/l.

5. PORÓWNANIE PROCESU KLASYFIKACJI HYDRAULICZNEJ W POLU GRAWITACYJNYM ORAZ PRZY ZASTOSOWANIU SIŁY ODŚRODKOWEJ - WYZNACZENIE TECHNOLOGICZNEGO KRYTERIUM PORÓWNAWCZEGO

5.1. Wybór parametru do analizy porównawczej klasyfikacji grawitacyjnej i odśrodkowej

W procesie klasyfikacji hydraulicznej w obiegach wodno-mułowych, których model przedstawiono na rys. 2.1 stosuje się równolegle z osadnikami grawitacyjnymi - hydrocyklony [4]. W polskich warunkach są to hydrocyklony o średnicach 280, 440 i 540 mm, których charakterystykę przedstawiono w rozdziale 4.

Parametrami charakteryzującymi przebieg procesu rozdziału w osadniku i hydrocyklonie są między innymi omówione w rozdziale 3 i 4:
- zagęszczenie produktów klasyfikacji,
- wychód produktów klasyfikacji,
- uzysk części stałych w produktach klasyfikacji.

Podstawowym jednakże parametrem w analizie porównawczej jest wielkość ziarna podziałowego d_{50}. Parametr ten w powiązaniu z charakterystyką nadawy do procesu klasyfikacji i ustawieniu pracy klasyfikatora decyduje o wymienionych wyżej pozostałych parametrach rozdziału.

W rozdziale 3 i 4 ustalono związek funkcyjny, istniejący między wydajnością klasyfikatora a wartością parametru rozdziału d_{50}. Przy ustabilizowanej pracy obiegu wodno-mułowego można przyjąć, że jedyną zmienną tej funkcji jest obciążenie jednostkowe klasyfikatora

$$d_{50} = f(q)$$

przy czym

- dla osadnika grawitacyjnego będzie to funkcja wyznaczona zgodnie z równaniem 3.23 dla stałej charakterystyki zawiesiny,
- dla hydrocyklonu zagadnienie to jest bardziej złożone, gdyż dla wyznaczenia takiej funkcji konieczna jest znajomość powierzchni klasyfikacji hydrocyklonu oraz konieczne jest uwzględnienie średnicy jego części cylindrycznej. Utrudnia to analizę porównawczą gdyż otrzymujemy funkcję

$$d_{50}^{H} = f\left(\frac{V_N}{F_H}, D\right) \qquad 5.1$$

gdzie

$$\frac{V_N}{F_H} = q_H = \frac{K\sqrt{p}}{F_H}$$

5.2. Powierzchnia klasyfikacji i obciążenie jednostkowe hydrocyklonu

Wyznaczenie obciążenia jednostkowego hydrocyklonu uwarunkowane jest znajomością powierzchni klasyfikacji hydrocyklonu [21].

Zagadnienie to jest w zasadzie jeszcze otwartym w teorii procesu klasyfikacji w hydrocyklonie. Punktem wyjścia dla wyznaczenia powierzchni klasyfikacji może być równanie ruchu cieczy i ziarna w hydrocyklonie. Ziarno, dla którego uzyskuje się zrównoważenie siły odśrodkowej i siły oporu ośrodka krąży w hydrocyklonie na określonym stałym promieniu zwanym promieniem równowagi krążącego ziarna [16]. Analiza zmiany wielkości promienia równowagi dla danego ziarna na różnych wysokościach w hydrocyklonie pozwala na wyznaczenie powierzchni równowagi ziarna krążącego w hydrocyklonie. Jak wykazały badania Kelsalla [16] powierzchnie równowagi ziarna krążącego w hydrocyklonie mają w przybliżeniu kształt stożkowy. Ziarno krążące w hydrocyklonie na promieniu równowagi znajduje się pod wpływem pionowego ruchu cieczy skierowanego w stronę otworów wylotowych hydrocyklonu. Rozdział strugi pionowej na dwa strumienie - w górę i w dół - w hydrocyklonie odbywa się wzdłuż sferycznej powierzchni prędkości osiowych. W związku z tym teoretycznie biorąc wszystkie ziarna, których powierzchnia równowagi krą-

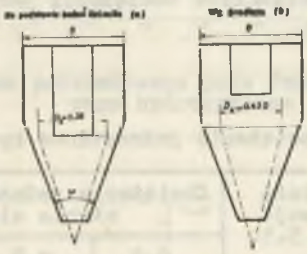
żenia znajduje się wewnątrz powierzchni zerowych prędkości osiowych znajdą się w produkcie górnym (przelewie) hydrocyklonu, natomiast ziarna o powierzchni równowagi krążenia umieszczonej na zewnątrz powierzchni zerowych prędkości osiowych kierowane będą do wylewu hydrocyklonu. Powierzchnia zerowych prędkości osiowych, decydująca o przebiegu procesu klasyfikacji określona jest jako powierzchnia klasyfikacji hydrocyklonu a ziarno krążące po powierzchni pokrywającej się z powierzchnią klasyfikacji definiowane jest jako ziarno podziałowe hydrocyklonu.

Powyższe założenia dotyczące:

- dokładnego rozdziału zbioru ziarn na dwa strumienie skierowane do otworów wylotowych hydrocyklonu,
- utożsamiania kształtu powierzchni równowagi z kształtem powierzchni klasyfikacji nie są ścisłe i wymagają analizy.

Występująca w hydrocyklonie turbulencja i lokalne zawirowanie strugi powodują zaburzenia w kształcie powierzchni równowagi krążenia i są przyczyną zaburzeń w przemieszczaniu ziarn w hydrocyklonie i pogorszenia ostrości rozdziału.

W niektórych przypadkach przyjmuje się również powierzchnię przekroju części cylindrycznej hydrocyklonu jako powierzchnię klasyfikacji. Dotyczy to szczególnie wyznaczenia obciążenia jednostkowego hydrocyklonów geometrycznie podobnych. Na rys. 51 przedstawiono kształt powierzchni klasyfikacji wyznaczonej na podstawie badań Kelsalla [16] i Bradley'a [9].



Rys. 51. Kształt powierzchni klasyfikacji hydrocyklonu wyznaczony na podstawie badań Kelsalla (a) i Bradley'a (b)

Dla wyników badań Kelsalla [16] można napisać przybliżony wzór [21] na powierzchnię klasyfikacji rys. 51a:

$$f_z = \frac{0,3\ D^2}{tg\ \frac{\varphi}{2}} \qquad 5.2$$

Przedstawiony na rys. 51b kształt powierzchni klasyfikacji wynikający z badań Bradley'a [9] ma następującą wartość [21]

$$f_z = \frac{0{,}237\ D^2}{tg\ \frac{\varphi}{2}} \qquad 5.3$$

Wynika stąd, że dla hydrocyklonów o tym samym kącie zbieżności stożka

$$f_z = K \cdot D^2 \qquad 5.4$$

co uzasadnia również przyjęcie wskaźnika powierzchni klasyfikacji odniesionego do powierzchni przekroju hydrocyklonu

$$f_z = \frac{\pi D^2}{4} = 0{,}785\ D^2 \qquad 5.5$$

Do obliczeń w pracy przyjęto funkcję 5.5 która najlepiej nadaje się do analizy porównawczej z osadnikami okrągłymi. Takie przyjęcie wskaźnika powierzchni klasyfikacji uzasadnione jest idealnym geometrycznym podobieństwem konstrukcji serii hydrocyklonów: 280, 440 i 540 mm. W związku z tym wyznaczona wzorem 5.5 powierzchnia różni się od powierzchni wyznaczonej wzorami 5.2 lub 5.3 o stały współczynnik - ten sam dla każdego hydrocyklonu.

Wartość powierzchni hydrocyklonów wyznaczonych wzorem 5.5 dla wielkości średnic: 280, 440 i 540 mm przedstawiono w tablicy 4.

Po przyjęciu nominalnych wydajności [3, 24, 29] dla omawianej serii hydrocyklonów można wyznaczyć wartość obciążenia jednostkowego tych hydrocyklonów. Jest oczywiste, że wartości te będą funkcją ciśnienia wlotowego do hydrocyklonu. Wartości wskaźników obciążenia jednostkowego zestawiono również w tablicy 4.

Tablica 4

Powierzchnia i obciążenie jednostkowe hydrocyklonu

Średnica części cylindrycznej hydrocyklonu mm	Powierzchnia klasyfikacji wg wzoru 5.5 m^2	Obciążenie jednostkowe m^3/m^2h dla ciśnienia wlotowego w atm			
		0,5	1,0	1,5	2,0
280	$6{,}16 \cdot 10^{-2}$	250	353	434	500
440	$15{,}2 \cdot 10^{-2}$	253	349	428	495
540	$22{,}9 \cdot 10^{-2}$	251	354	437	500

5.3. Wielkość ziarna podziałowego jako funkcja obciążenia jednostkowego hydrocyklonu

Jak wynika z nomogramów przedstawionych na rys. 49 i 50 wielkość ziarna podziałowego jest dla danych warunków funkcją średnicy hydrocyklonu. Wiadomo również, że dla ustalonych warunków pracy hydrocyklonu wielkość

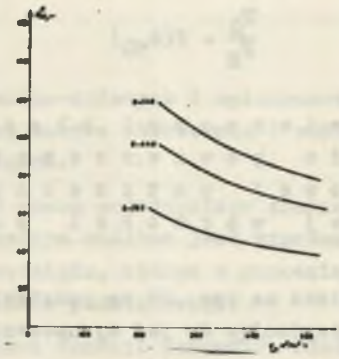
ziarna podziałowego jest funkcją ciśnienia. Dla danego hydrocyklonu jest to równoznaczne z jego obciążeniem jednostkowym. W związku z tym dla wyznaczenia funkcji:

$$d_{50}^{H} = f(q_H, D) \qquad 5.6$$

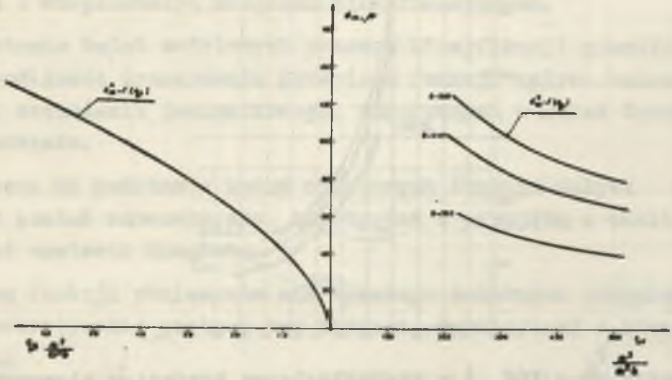
przyjęto tą podstawową zależność funkcyjną $d_{50}^{H} = f(p)$.

W analizie porównawczej przyjęto również wartość ziarna podziałowego dla hydrocyklonu o średnicy 440 mm [29]. Dla porównywalnych warunków uzyskano dla ciśnienia 2 atn wartość ziarna podziałowego około 65μ.

Na podstawie tych danych wyjściowych można było wykreślić funkcje $d_g = f(q_H, D)$. Funkcje te przedstawione są na rys. 52.



Rys. 52. Wielkość ziarna podziałowego jako funkcja obciążenia jednostkowego hydrocyklonu



Rys. 53. Wielkość ziarna podziałowego procesu klasyfikacji jako funkcja obciążenia jednostkowego urządzenia klasyfikującego

Przy stałej wartości β_N otrzymuje się w związku z tym dla analizy porównawczej procesu klasyfikacji grawitacyjnej i odśrodkowej zespół krzywych przedstawionych na rys. 53.

Wyraźne jest duże zróżnicowanie w dopuszczalnym obciążeniu jednostkowym osadnika grawitacyjnego dla danej wielkości ziarna podziałowego odpowiadającej hydrocyklonom o różnej średnicy.

5.4. Wyznaczenie kryterium technologicznego

Sposób porównania procesów klasyfikacji przedstawiony wyżej uniemożliwia podanie jednoznacznego kryterium porównawczego tych dwóch typów urządzeń.

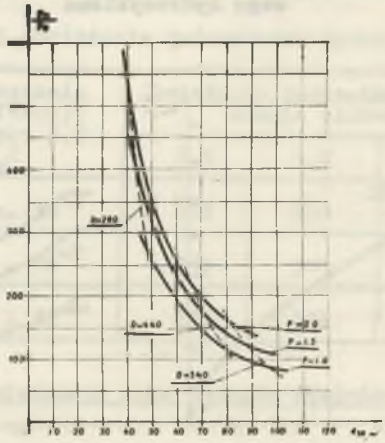
Analiza zespołu krzywych przedstawionych na rys. 49 wykazuje możliwość ustalenia funkcji o jednej zmiennej oraz jej graficznego wyznaczenia o dokładności wystarczającej dla celów praktycznych. Jest to funkcja

$$\frac{F_G}{F_H} = f(d_{50}) \qquad 5.7$$

wyznaczająca:

- stosunek powierzchni klasyfikacji grawitacyjnej do powierzchni klasyfikacji odśrodkowej potrzebny do uzyskania tej samej wartości parametru rozdziału d_{50}.

Funkcję 5.7 przedstawiono na rys. 54 na podstawie wyników badań podanych w rozdziale 3 i 4 przyjmując do jej wyznaczenia stałe zagęszczenie zawiesiny około 100 g/l.



Rys. 54. Funkcja $\frac{F_G}{F_H} = f(d_{50})$ - technologiczne kryterium stosowania hydrocyklonu i osadnika grawitacyjnego do procesu wstępnego oczyszczania wody obiegowej

Funkcję tę można traktować jako technologiczne kryterium stosowania osadników grawitacyjnych i hydrocyklonów o średnicach od 280 do 540 mm w obiegach wodno-mułowych zakładów przeróbczych węgla. Z analizy uzyskanego kryterium wypływają następujące wnioski:

1) stwierdza się niezwykle duży wpływ średnicy hydrocyklonu na wartość kryterium technologicznego i tak dla hydrocyklonu o średnicy 280 mm uzyskuje wartości powyżej 500 natomiast dla hydrocyklonu o średnicy 540 jedynie wartości 100 do 200,
2) funkcja 5.7 ze względu na jej ścisły związek ze średnicą hydrocyklonu może być funkcją wyjściową do wyznaczenia kryterium ekonomicznego klasyfikacji grawitacyjnej i odśrodkowej w obiegu wodno-mułowym oraz daje możliwość obliczenia optymalnej średnicy hydrocyklonu dla danych warunków pracy w tym obiegu.

6. WNIOSKI

1. Z analizy procesów wodno-mułowych i opracowanej na tej podstawie systematyki obiegów wynika zakres stosowania i zadania klasyfikacji hydraulicznej w tych obiegach.
2. Na podstawie analizy ruchu pojedynczego ziarna oraz zachowania się zbioru ziarn w ośrodku wodnym możliwe jest wyprowadzenie ogólnej postaci funkcji parametru rozdziału, którym w procesie klasyfikacji hydraulicznej jest wielkość ziarna podziałowego.
3. Analiza ogólnej postaci funkcji parametru rozdziału pozwala na stwierdzenie, że jej najistotniejszymi elementami są:
   - funkcja wpływu koncentracji ujmująca w swojej postaci zjawiska skrępowanego opadania zbioru ziarn oraz
   - funkcja obciążenia jednostkowego, będąca parametrem związanym z doborem i eksploatacją urządzeń klasyfikacyjnych.
4. Na podstawie badań modelowych procesu klasyfikacji grawitacyjnej stwierdzono możliwość wyznaczenia przebiegu funkcji wpływu koncentracji oraz funkcji obciążenia jednostkowego, wchodzących w skład funkcji parametru rozdziału.
5. Wyznaczona na podstawie badań modelowych funkcja wpływu koncentracji posiada postać matematyczną, identyczną z przyjętą w analizie funkcją lepkości zawiesin Binghama.
6. Przebieg funkcji obciążenia nie wykazuje istotnych odchyleń w stosunku do teoretycznej postaci tej funkcji, wynikającej z równania oporu Stokesa.
7. Badania modelowe klasyfikacji hydraulicznej - odśrodkowej w hydrocyklonach oraz opracowana na tej podstawie metodyka pozwalają na wyznacze-

nie nomogramów działania tych urządzeń. Nomogramy te stanowią graficzną postać funkcji parametrów rozdziału hydrocyklonu i uwzględniają jakość zawiesin oraz obciążenie hydrocyklonu.

8. Analiza porównawcza procesów klasyfikacji grawitacyjnej i odśrodkowej dała w wyniku opracowanie kryterium technologicznego stosowania tych dwóch procesów w obiegach wodno-mułowych zakładów przeróbczych węgla.

9. Wyprowadzone w badaniach wzory empiryczne i nomogramy mogą być wykorzystane w praktyce w działalności technicznej, związanej z modernizacją lub projektowaniem obiegów wodno-mułowych.

10. Z wyników niniejszej pracy wyłaniają się nowe problemy, których realizacja umożliwi rozwinięcie i poszerzenie omawianego tematu oraz lepsze poznanie procesów wodno-mułowych. Są nimi między innymi:
- badania modelowe na opisanej w pracy instalacji nad procesem sedymentacji zawiesin sflokulowanych i wyznaczenie parametrów tego procesu,
- prace nad modelem matematycznym procesów wodno-mułowych i obiegu wodno-mułowego.

ZESTAWIENIE WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

A - wypór ziarna
C - stałe
D - średnica części cylindrycznej hydrocyklonu
D_k - średnica podstawy stożkowej powierzchni zerowych prędkości osiowych, średnica podstawy stożkowej powierzchni klasyfikacji,
d - średnica ziarna (wymiar ziarna)
d_{50}^{G} - ziarno podziałowe osadnika grawitacyjnego
d_{50}^{H} - ziarno graniczne hydrocyklonu
E_i - odchylenie $y - \bar{y}$
e - podstawa logarytmu naturalnego $e = 2{,}71828$
F - powierzchnia urządzenia klasyfikującego
F_H - przekrój części cylindrycznej hydrocyklonu, powierzchnia klasyfikacji hydrocyklonu
F_G - powierzchnia klasyfikacji osadnika grawitacyjnego
f - przekrój ziarna
f_z - powierzchnia zerowych prędkości osiowych lub powierzchnia klasyfikacji hydrocyklonu
G - ciężar ziarna
g - przyspieszenie ziemskie
h - całkowita wysokość hydrocyklonu
i - ilość hydrocyklonów

K, k - stałe
m - masa ziarna
N - moc
n - wykładnik potęgowy
p - ciśnienie statyczne wlotowe do hydrocyklonu, atn
q_G - obciążenie jednostkowe klasyfikatora grawitacyjnego
q_H - obciążenie jednostkowe hydrocyklonu
R - rozdział ilościowy klasyfikatora
Re - liczba Reynoldsa
S - suma kwadratów odchyleń
t_α - wartość rozkładu studenta
V_N - ilość zawiesiny kierowanej do klasyfikatora
V_w, V_p - ilość zawiesiny w przelewie lub wylewie klasyfikatora
v, v_c - prędkość przepływu strugi cieczy
v_z - prędkość opadania ziarna
W - opór ośrodka
x, y - współrzędne w prostokątnym układzie współrzędnych
α - poziom ufności przyjęty w ocenie równań empirycznych
$\beta_N, \beta_P, \beta_W$ - zagęszczenie nadawy, przelewu i wylewu klasyfikatora, g/l
γ_z - ciężar właściwy ziarna
γ_c - ciężar właściwy cieczy
γ_n - ciężar właściwy nadawy do hydrocyklonu
γ_w - objętościowy wychód produktu dolnego klasyfikatora, %
ε - koncentracja objętościowa fazy stałej w zawiesinie
ε_u - przedział ufności w ocenie równań empirycznych
η - współczynnik lepkości dynamicznej zawiesiny
η_o - współczynnik lepkości dynamicznej czystej wody
η_H - uzysk części stałych w wylewie hydrocyklonu
ϱ_c - gęstość właściwa cieczy
ϱ_z - gęstość właściwa ziarna
σ - odchylenie standartowe
φ - kąt zbieżności stożka
ψ - współczynnik oporu ośrodka ciekłego będący funkcją liczby Reynoldsa

LITERATURA

[1] Abbott A. - The use of Bretby hydrocyclones for thickening of fines. Coal Preparation, 2, 1967.

[2] Battaglia A. - Odwadnianie produktów wzbogacania i obiegi wodne płuczek, WGH II wydanie, 1963.

[3] Battaglia A. - Badania nad działaniem hydrocyklonu zagęszczająco-klarującego BPPMW-282. Prace GIG, 1961, Nr 270.

[4] Battaglia A. - Wytyczne do projektowania zamkniętych obiegów wodnych zakładów przeróbki mechanicznej węgla. Materiały B.P. Separator.

[5] Battaglia A. - Wzór na wydajność objętościową hydrocyklonu typu konwencjonalnego. Archiwum Górnictwa, 1962 zesz. 2.

[6] Barskij M.D., Sokolkin J.W. - Stochasticzeskaja model procesu rawnowiesnoj klasyfikacji w woschodiaszczym laminarnym potokie, Gornyj Żurnal, 7, 1969.

[7] Bingham E.C. - Fluidity and Plasticity, Mc Grew Hill, 1922.

[8] Borochowicz A.J. - Rezultaty opredielenia effekta oswietlenia zagriazennych szachtnych wod na modelach wertikalnych odstojnikow, Gornyj Żurnal, 4, 1963.

[9] Bradley D. - Flow patterns in the hydraulic cyclone and their interpretation in terms of performance. Trans. Inst. Chem. Engers. Val. 37, 1959.

[10] Ciborowski J. - Inżynieria chemiczna, PWN Warszawa, 1952.

[11] Cramer H. - Metody matematyczne w statystyce, 1958 PWN W-wa.

[12] Czarkowski H. - Przeróbka rud, WGH, 1958.

[13] Davis D.S. - Nomography and empirical equations, New York, 1962.

[14] Dietrych J. - Zasady funkcjonalnego podziału zakładu wzbogacania węgla. Przegląd Górniczy Nr 6, 1967.

[15] Fisz M. - Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna, 1967 PWN W-wa.

[16] Kelsall D.F. - A study of motion of solid particles in a hydraulic cyclone. Trans. Inst. Chem. Engrs. Vol. 30, 1952.

[17] Laskowski J. - Fizykochemiczne procesy w przeróbce mechanicznej, WGH, 1969.

[18] Laskowski J. - Porównanie wzorów najczęściej stosowanych do obliczenia powierzchni osadników o działaniu ciągłym. Przegląd Górniczy, 10, 1959.

[19] Laskowski T. - Systematyka procesów przeróbczych dla celów normalizacji - Prace PKN, 1969.

[20] Mielczarski T. - Nowe środki chemiczne w przeróbce mechanicznej węgla. Przegląd Górniczy, 1961.

[21] Nowak Z. - Hydrocyklony w przeróbce mechanicznej kopalin - WGH - w druku.

[22] Nowak Z. - Technologiczne kryteria stosowania hydrocyklonów i osadników grawitacyjnych. Dokumentacja prac GIG, 1966.

[23] Nowak Z. - Porównanie technologicznych parametrów pracy hydrocyklonu i osadnika - Separator, 1965.

[24] Nowak Z. - Badania nad działaniem hydrocyklonu zagęszczająco-klarującego 540 mm. Przegląd Górniczy, 1965.

[25] Nowak Z. - Ilościowy rozdział produktów w hydrocyklonie. Praca doktorska - Prace Głównego Instytutu Górnictwa, 1966.

[26] Nowak Z. - Sprawozdanie ze stażu w Wielkiej Brytanii - Prace Dokumentacyjne GIG - 1962.

[27] Nowak Z., Kozłowski C., Romańczyk E. - Nowa technologia prowadzenia obiegu wodno-mułowego w układzie zamkniętym na przykładzie pracy zakładu przeróbczego Kop. Siemianowice, Przegląd Górniczy, 1970.

[28] Pawłow K.F. i inni - Przykłady i zadania z zakresu aparatury i inżynierii chemicznej PWT, 1958.

[29] Praca zbiorowa - Badania technologiczne hydrocyklonu N2-440 mm. Dokumentacja prac. Z. Badań Maszyn BP Separator.

[30] Praca zbiorowa - Steinkohlenaufbereitung, SKB, 1952.

[31] Praca zbiorowa - Operacje jednostkowe w inżynierii chemicznej.

[32] Sztaba K. - Metoda badania klasyfikacji mokrej, Arch. Górn. T. I z.1.

[33] Sztaba K. - Jednolity system badania podstawowych własności geometrycznych ziarn mineralnych i ich zbiorów, Arch. Górn. 1967 r.

[34] Walt V.D., Fourie A.M. - Referat na Międzynarodowy Kongres Przeróbki Mechanicznej Węgla, Essen, 1954.

[35] Whitmore R.L. - Uber die Bewegung von Festkörpan in Flüssigkeiten, Berghauwissenschaften, 9, 1962.

[36] Whitmore R.L. - Relationship of the viscosity to the setting rate. Journ. Inst. Fuel, 5, 1957.

[37] Zahaczewski R. - Wpływ kształtu i wielkości ziarn na wysokość oporów hydraulicznych przy przepływie mieszanin wody i węgla w rurociągach poziomych. Prace GIG, Nr 309, 1963.

KLASYFIKACJA HYDRAULICZNA W OBIEGU WODNO-MUŁOWYM I TECHNOLOGICZNE KRYTERIUM JEJ STOSOWANIA

S t r e s z c z e n i e

W pracy omówiono zadania i wyznaczono zakres stosowania klasyfikacji hydraulicznej w obiegu wodno-mułowym zakładu przeróbki mechanicznej węgla.

Jako podstawowy parametr procesu klasyfikacji przyjęto wielkość ziarna podziałowego.

Przedmiotem badań są dwa rodzaje procesów klasyfikacji:

- klasyfikację grawitacyjną w polu siły ciężkości,
- klasyfikację odśrodkową w polu siły odśrodkowej.

Na podstawie analizy równania oporu ośrodka Stokesa oraz analizy rzeczywistych warunków procesu sedymentacji przemysłowej wyznaczono ogólną postać wzoru na wartość parametru rozdziału klasyfikacji grawitacyjnej d_{50}^{G} dla opadania zbioru ziarn w zawiesinie:

$$d_{50}^{G} = \sqrt{\frac{18}{g(\rho_z - \rho_c)}} \sqrt{\frac{\rho_o}{1-k\varepsilon}} \sqrt{V_N (1-R)} \sqrt{\frac{1}{K_F \; F_G}} \sqrt{K_d}$$

funkcja ciężaru właściwego	funkcja lepkości Binghama	funkcja skorygowanego obciążenia osadnika	funkcja profilu przepływu zawiesiny w osadniku	parametr kształtu ziarna

gdzie:

ρ_z, ρ_c - gęstość ziarna i cieczy,

ε - koncentracja objętościowa zawiesiny,

V_N - ilość zawiesiny przepływającej przez osadnik,

R – rozdział ilościowy zawiesiny w osadniku,
K_d – współczynnik kształtu ziarna,
K_p – współczynnik profilu przepływu zawiesiny w osadniku,
F_G – powierzchnia klasyfikacji grawitacyjnej,
ρ_o – lepkość cieczy,
g – przyspieszenie ziemskie.

Badania modelowe na stanowisku badawczym pozwoliły na weryfikację tej funkcji wyjściowej oraz wyznaczenie wzoru empirycznego:

$$d_{50}^{G} = 225,74 \sqrt{\frac{\rho_o}{\Delta\varrho}} \sqrt{1 - R} \sqrt{\frac{1}{1 - 5,215\varepsilon}} \; q^{0,54}$$

Dla klasyfikacji odśrodkowej wyznaczono na podstawie badań modelowych nomogramy parametrów działania typowych hydrocyklonów przemysłowych.

Analiza i porównanie obu procesów dało w efekcie technologiczne kryterium ich stosowania w obiegach wodno-mułowych zdefiniowane jako: "stosunek powierzchni klasyfikacji grawitacyjnej do powierzchni klasyfikacji odśrodkowej potrzebnej dla uzyskania tej samej wartości parametru rozdziału d_{50}".

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ В ВОДНО-ШЛАМОВОМ ХОЗЯЙСТВЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье обсуждаются задачи гидравлической классификации и определяется область её применения в водно-шламовом хозяйстве обогатительной фабрики.

Как основной параметр классификации принята величина зерна раздела.

Предметом исследований являются два вида классификационных процессов:

- гравитационная классификация в поле силы тяжести,
- центробежная классификация в поле центробежной силы.

На основе анализа уравнения сопротивления среды Стокеса и анализа действительных условий процесса промышленной седиментации определяется общий вид формулы значения параметра разделения гравитационной классификации x_{50}^{r} для оседания собирающихся в суспензии зёрен:

$$x_{50}^{\Gamma} = \sqrt{\frac{18}{g(\rho_z-\rho_c)}}\ \sqrt{\frac{\eta_o}{1-k\varepsilon}}\ \sqrt{V_N\,(1-R)}\ \sqrt{\frac{1}{K_F\,F_G}}\ \sqrt{K_d}$$

функция удельного веса	функция вязкости Бингхама	функция исправленной нагрузки отстойника	функция профиля течения суспензии в отстойнике	параметр формы зерна

где:

ρ_z, ρ_c - плотность зерна и жидкости,
ε - объёмная концентрация суспензии,
V_N - количество суспензии проплывающей через отстойник,
R - количественное разделение суспензии в отстойнике,
K_d - коэффициент формы зерна,
K_F - коэффициент профиля течения суспензии в отстойнике,
F_G - поверхность гравитационной классификации,
η_o - вязкость жидкости,
g - земное ускорение.

Модельные испытания на испытательном стенде позволили проверить эту исходную функцию и определить эмпирическую формулу:

$$d_{50}^{G} = 225{,}74\ \sqrt{\frac{\eta_o}{\rho_z-\rho_c}}\ \sqrt{1-R}\ \sqrt{\frac{1}{1-5.215\varepsilon}}\ q^{0{,}54}$$

Для центробежной классификации на основе модельных испытаний определяются номограммы параметров действия типичных промышленных гидроциклонов.

Результатом анализа и сопоставления обоих процессов является технологический критерий их применения в водно-шламовом хозяйстве, который определяется как: "отношение поверхности гравитационной классификации к поверхности центробежной классификации, необходимой для получения этого же значения параметра разделения d_{50}".

HYDRAULIC CLASSIFICATION IN THE WATER CIRCUIT AND THE TECHNICAL CRITERIA OF ITS APPLICATION

S u m m a r y

The main problems of hydraulic classification in the water circuit of a coal preparation plant and the range of its application had been touched upon.

As a basic parameter distinguishing the classification process the partition size d_{50} had been taken.

Two problems were the subject of investigation:

- gravitational classification and
- centrifugal classification in hydrocyclones.

On the basis of Stokes Law and the analysis of sedimentation of slurries in industrial conditions the general equation for the "gravitational" partition size had been defined as:

$$d_{50}^{G} = \sqrt{\frac{18}{g(\rho_z-\rho_c)}} \sqrt{\frac{\eta_0}{1-k\,\varepsilon}} \sqrt{V_N\,(1-R)} \sqrt{\frac{1}{K_F\,F_G}} \sqrt{K_d}$$

specific gravity function	Bingham apparent viscosity function	corrected function of the specific load of the classifier	function of slurry flow through thec classifier	solids shape parameter

where:

ρ_z, ρ_c - solid and liquid density,
ε - volumetric concentration of solids,
V_N - total feed flow rate,
R - flow ratio = underflow rate/feed rate,
K_d - solids shape parameter,
K_F - flow parameter through the classifier,
F_G - classification surface,
η_0 - viscosity of the lequid,
g - gravitational acceleration.

Experimental work carried out on a model instalation enabled examination of the theoretical function and had given the empirical equation

$$d_{50}^{G} = 225{,}74 \sqrt{\frac{\eta_0}{\rho_z - \rho_c}} \sqrt{1 - R} \sqrt{\frac{1}{1 - 5{,}215\varepsilon}}\; q^{0{,}54}$$

For the "centrifugal" classification, nomographes had been prepared for predicting the performance of a industrical hydrocyclon applied to particular industrial conditions.

The comparison of both processes gave as a result the technical criteria of their practical application defined as "relation of the gravitational classification surface to the centrifugal classification surface which is necessary to achieve the same value of the partition size d_{50}".

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ukazują się w następujących seriach:

A. AUTOMATYKA
B. BUDOWNICTWO
Ch. CHEMIA
E. ELEKTRYKA
En. ENERGETYKA
G. GÓRNICTWO
IS. INŻYNIERIA SANITARNA
JO. JĘZYKI OBCE
MF. MATEMATYKA-FIZYKA
M. MECHANIKA
NS. NAUKI SPOŁECZNE

Dotychczas ukazały się następujące zeszyty
serii G:

Górnictwo z. 1, 1956 r., s. 134, zł 20,—
Górnictwo z. 2, 1959 r., s. 96, zł 17,10
Górnictwo z. 3, 1961 r., s. 130, zł 21,—
Górnictwo z. 4, 1962 r., s. 134, zł 10,95
Górnictwo z. 5, 1963 r., s. 158, zł 11,90
Górnictwo z. 6, 1963 r., s. 154, zł 8,50
Górnictwo z. 7, 1963 r., s. 129, zł 6,80
Górnictwo z. 8, 1964 r., s. 175, zł 10,20
Górnictwo z. 9, 1964 r., s. 133, zł 10,50
Górnictwo z. 10, 1964 r., s. 157, zł 8,75
Górnictwo z. 11, 1964 r., s. 221, zł 13,10
Górnictwo z. 12, 1964 r., s. 304, zł 15,20
Górnictwo z. 13, 1965 r., s. 145, zł 8,40
Górnictwo z. 14, 1965 r., s. 78, zł 5,—
Górnictwo z. 15, 1966 r., s. 79, zł 5,—
Górnictwo z. 16, 1966 r., s. 91, zł 7,—
Górnictwo z. 17, 1966 r., s. 113, zł 8,—
Górnictwo z. 18, 1966 r., s. 291, zł 16,—
Górnictwo z. 19, 1966 r., s. 150, zł 11,—
Górnictwo z. 20, 1966 r., s. 84, zł 5.—
Górnictwo z. 21, 1967 r., s. 270, zł 17,—
Górnictwo z. 22, 1967 r., s. 196, zł 12,—
Górnictwo z. 23, 1967 r., s. 69, zł 4,—
Górnictwo z. 25, 1967 r.. s. 96, zł 5,—
Górnictwo z. 26, 1968 r., s. 137, zł 10,—
Górnictwo z. 27, 1967 r., s. 378, zł 24,—
Górnictwo z. 28, 1968 r., s. 185, zł 11,—
Górnictwo z. 29, 1968 r., s. 161, zł 9,—
Górnictwo z. 30, 1968 r., s. 237. zł 14,—
Górnictwo z. 31, 1968 r., s. 119, zł 8,—
Górnictwo z. 32, 1968 r., s. 97, zł 6,—
Górnictwo z. 33, 1968 r., s. 113, zł 6,—
Górnictwo z. 34, 1968 r., s. 111, zł 7,—
Górnictwo z. 35, 1968 r., s. 143.
Górnictwo z. 36, 1969 r., s. 243. zł 13,50
Górnictwo z. 37, 1969 r., s. 234, zł 14,—
Górnictwo z. 38, 1969 r., s. 167, zł 10,—
Górnictwo z. 39, 1969 r., s. 76, zł 4,50
Górnictwo z. 40, 1969 r., s. 107, zł 7,—
Górnictwo z. 41, 1969 r., s. 642, zł 42,—

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P 3351/70