R-3359/82

ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

GÓRNICTWO

Z. 120
GLIWICE
1982

P 3351/82

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 732

KRYSTIAN KALINOWSKI

IDENTYFIKACJA I STEROWANIE PROCESAMI WZBOGACANIA WĘGLA WE WZBOGACALNIKACH Z CIECZĄ CIĘŻKĄ I W OSADZARKACH

GLIWICE 1982

OPINIODAWCA

Doc. dr hab. inż. Stanisław Cierpisz

KOLEGIUM REDAKCYJNE

Wiesław Gabzdyl (redaktor naczelny), *Mirosław Chudek* (redaktor działu), *Elżbieta Stinzing* (sekretarz redakcji)

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Anna Błażkiewicz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372-9508

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 200+85 Ark. wyd. 7,1 Ark. druk. 6,875 Papier druk. kl. V 70x100, 70 g
Oddano do druku 12.07.82 Podpis. do druku 3.11.82 Druk ukończ. w listop. 1982
Zam. 700/82 B-24 Cena zł 71,-

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

SPIS TREŚCI

Str.

PRZEDMOWA 7

1. STAN WIEDZY DOTYCZĄCY STEROWANIA PROCESAMI WZBOGACANIA WĘGLA ORAZ CEL I TEZY PRACY 9

1.1. Opis matematyczny i identyfikacja procesów wzbogacania .. 9
1.2. Matematyczny opis węgla surowego 10
1.3. Identyfikacja procesów wzbogacania 11
1.4. Zagadnienie struktury sterowania 11
1.5. Cele i tezy pracy 12

2. STATYCZNE MODELE PROCESÓW WZBOGACANIA WE WZBOGACALNIKACH Z CIĘCZĄ CIĘŻKĄ I W OSADZARKACH 14

2.1. Wstęp 14
2.2. Wybór wzorów empirycznych do aproksymacji charakterystyk statycznych wzbogacalnika z cieczą ciężką 17
2.2.1. Aproksymacja charakterystyki wychodu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej 19
2.2.2. Aproksymacja charakterystyki zapopielenia koncentratu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej..... 20
2.3. Wybór wzorów empirycznych do aproksymacji charakterystyki osadzarki 21
2.4. Uwagi i wnioski dotyczące opracowanych modeli statycznych 24

3. DYNAMICZNE MODELE PROCESÓW WZBOGACANIA 25

3.1. Dwustrefowy model wzbogacalnika z cieczą ciężką 25
3.1.1. Cyfrowy model procesu wzbogacania węgla w dwuproduktowym wzbogacalniku z cieczą ciężką 28
3.1.2. Analiza stanu ustalonego 30
3.1.3. Współzależność parametrów modelu i uogólnionej charakterystyki wzbogacalnika 31
3.2. Model procesu wzbogacania węgla w trójproduktowym wzbogacalniku z cieczą ciężką 33
3.3. Dynamiczny model procesu wzbogacania w osadzarce 36
3.3.1. Różnicowy model matematyczny procesu wzbogacania w osadzarce 36
3.3.22 Analiza stanu ustalonego procesu wzbogacania w osadzarce 38
3.3.3. Model procesu wzbogacania w trójproduktowej osadzarce 40

Str.

3.4. Matematyczny model nadawy 43
3.4.1. Własności nadawy 43
3.4.2. Natężenie strugi nadawy 44
3.5. Matematyczny model radiometrycznego czujnika zapopielenia produktów wzbogacania 44
3.6. Matematyczny model wskazań czujników natężenia przepływu (wag taśmowych) 46
3.7. Uwagi dotyczące dynamicznych modeli wzbogacalników cieczy ciężkiej, osadzarek, nadawy oraz modeli czujników pomiarowych 47
4. IDENTYFIKACJA PROCESU WZBOGACANIA WĘGLA WE WZBOGACALNIKU Z CIECZĄ CIĘŻKĄ I W OSADZARCE 48
4.1. Podstawy teoretyczne 48
4.1.1. Założenia 48
4.1.2. Wyznaczanie współczynników regresji metodą najmniejszych kwadratów 50
4.1.3. Dokładność wyznaczania współczynników regresji..... 51
4.1.4. Identyfikacja a problemy pomiarowe 53
4.1.5. Identyfikacja charakterystyki statycznej przy pomiarach ciągłych 55
4.1.6. Identyfikacja charakterystyki statycznej przy pomiarach dyskretnych 57
4.2. Badania symulacyjne identyfikacji procesu wzbogacania we wzbogacalnikach z cieczą ciężką 59
4.2.1. Dane do symulacji nadawy 59
4.2.2. Dane do wzbogacalnika 61
4.2.3. Wyniki badań identyfikacji charakterystyki wychodu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej przy dyskretnych pomiarach natężenia strug produktów wzbogacania 62
4.2.4. Wyniki badań identyfikacji charakterystyki zapopielenia koncentratu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej metodą symulacji 64
4.2.5. Wyniki badań identyfikacji charakterystyki wychodu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej przy pomiarach ciągłych 67
4.2.6. Wyniki badań identyfikacji charakterystyki zapopielenia koncentratu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej przy pomiarach ciągłych 71
4.2.7. Wyniki badań identyfikacji charakterystyki zapopielenia w funkcji gęstości cieczy ciężkiej przy pomiarach ciągłych natężenia strug i dyskretnych pomiarach zapopielenia produktów wzbogacania..... 73
4.2.8. Porównanie dokładności wyznaczania współczynników regresji przy różnych metodach pomiarowych 75
4.3. Badania symulacyjne identyfikacji procesu wzbogacania w trójproduktowej osadzarce 76
4.3.1. Dane do symulacji nadawy 76
4.3.2. Dane wzbogacalnika 77

Str.

4.3.3. Wyniki badań metodą symulacji charakterystyki wychodu koncentratu w funkcji jego zapopielenia 79
4.3.4. Uwagi i wnioski z badań symulacyjnych procesu wzbogacania w osadzarce 81
4.4. Uwagi i wnioski dotyczące uzyskanych wyników badań identyfikacji procesów wzbogacania węgla 81
5. OPTYMALIZACJA STATYCZNA PROCESU WZBOGACANIA WĘGLA W SYSTEMIE AUTOMATYCZNEGO STEROWANIA 83
5.1. Wstęp 83
5.2. Optymalizacja statyczna wzbogacania węgla ze stałą strukturą procesu technologicznego 84
5.2.1. Przykład optymalizacji zespołu równolegle pracujących czterech wzbogacalników 87
5.2.2. Optymalizacja przy ograniczeniu związanym z wyprodukowaniem produktów o dopuszczalnym zapopieleniu 90
5.3. Optymalizacja statyczna przy możliwości zmiany struktury mieszania produktów wzbogacania 93
5.3.1. Zapis struktury mieszania produktów wzbogacania 93
5.3.2. Liczba możliwych sposobów mierzania strug produktów wzbogacania 94
5.3.3. Optymalizacja przy ograniczeniu związanym z wyprodukowaniem produktu o dopuszczalnym zapopieleniu z uwzględnieniem możliwości zmiany struktury mieszania koncentratów..... 95
5.3.4. Optymalizacja przy ograniczeniach związanych z wyprodukowaniem produktów o określonych dwóch dopuszczalnych zapopieleniach z możliwością zmian sposobu mieszania produktów wzbogacania 95
5.3.5. Wpływ zmian natężenia strugi nadawy na optymalne warunki wzbogacania 100
5.4. Uwagi i wnioski..... 100
6. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI OGÓLNE 102
7. LITERATURA 105
STRESZCZENIA 108

PRZEDMOWA

Uzyskiwane wyniki pracy wdrożonych dotychczas układów automatycznej regulacji elementarnych procesów i stałych ciągów technologicznych zakładów wzbogacania kopalin stałych są zadowalające. Dalszym etapem rozwoju automatyzacji w tych zakładach może być automatyzacja kompleksowa. Świadczą o tym badania prowadzone w różnych ośrodkach badawczych w kraju i za granicą. Kierunki tych badań dotyczą przede wszystkim takich zagadnień, jak: modele matematyczne procesów wzbogacania, ich identyfikacja i optymalizacja [3,5,8,10,15,37,40,42,49,52,53]. Automatyzacja kompleksowa umożliwia sterowanie poszczególnymi procesami, tak aby uzyskać maksymalne efekty globalne pracy zakładu przy uwzględnieniu planów produkcyjnych, ograniczeń technologicznych i zmieniających się własności nadawy.

Opracowanie systemu automatyzacji kompleksowej wiąże się z rozwiązaniem szeregu złożonych problemów. Do takich problemów można zaliczyć identyfikację elementarnych procesów przeróbczych oraz ich optymalizację.

W zakładach przeróbki mechanicznej węgla stosuje się przede wszystkim procesy wzbogacania grawitacyjnego ziaren grubych we wzbogacalnikach zawiesinowych, a drobnych - w osadzarkach.

Automatyczna identyfikacja procesu wymaga odpowiedniego oprzyrządowania. Nieznane są wymagane parametry czujników pomiarowych oraz parametry algorytmu identyfikacji.

Celem badań przedstawionych w niniejszej pracy było określenie podstawowych wielkości związanych z algorytmem identyfikacji procesów wzbogacania w trójproduktowych wzbogacalnikach cieczy ciężkiej i osadzarce metodą najmniejszych kwadratów, wyznaczenie parametrów czujników pomiarowych oraz sformułowanie i przedstawienie zagadnień związanych z optymalizacją statyczną tych procesów, z uwzględnieniem możliwości sterowania strukturą technologiczną mieszania produktów wzbogacania.

Wyżej wymienione badania przeprowadziłem będąc na stażu naukowym w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym SMEAG w Katowicach. Chciałbym w tym miejscu podziękować Dyrekcji OBR-SMEAG za umożliwienie mi odbycia stażu i wykonania czasochłonnych obliczeń w tamtejszym Ośrodku Obliczeniowym.

1. STAN WIEDZY DOTYCZĄCY STEROWANIA PROCESAMI WZBOGACANIA WĘGLA ORAZ CEL I TEZY PRACY

W problemach sterowania procesami technologicznymi [6,36,55] występują następujące podstawowe zagadnienia, wymagające opracowania:

- modele matematyczne i identyfikacja procesów,
- synteza struktury sterowania,
- tworzenie algorytmów sterowania.

Stan wiedzy związany ze sterowaniem procesami wzbogacania węgla rozpatrzony zostanie według wyżej wymienionych zagadnień.

1.1. Opis matematyczny i identyfikacja procesów wzbogacania

W różnych ośrodkach badawczych w kraju i za granicą [5,8,10,14,25], w zależności od potrzeb i sposobu rozpatrywania zjawisk, stosowane są różne metody opisu matematycznego procesów wzbogacania. Opisane w literaturze modele można podzielić na dwie klasy:

- o stałych skupionych (analityczne deterministyczne lub stochastyczne oraz empiryczne),
- o stałych rozłożonych.

Modele o stałych skupionych - analityczne zostały przedstawione w pracach [28,29,50]. Modele te opierają się na założeniu, że prawdopodobieństwo P_i przejścia frakcji o średniej gęstości δ_i do produktu pływającego, przy gęstości rozdziału δ_r, wynosi:

$$P_i = \Phi\left(\frac{\delta_i - \delta_r}{\delta_{pr}}\right) \qquad (1.1)$$

gdzie:

P_i - prawdopodobieństwo przejścia frakcji o średniej gęstości δ_i do produktu lżejszego przy gęstości δ_r,

δ_{pr} - wariancja rozkładu prawdopodobieństwa,

Φ - dystrybuanta rozkładu normalnego.

Jeden z najbardziej uniwersalnych modeli symulacyjnych procesów wzbogacania opracowany został w USA w US Bureau of Mines [14] i zmodyfikowany

przez autorów prac [10,12]. W modelu tym wykorzystuje się uogólnione krzywe rozdziału w postaci:

$$\frac{q_i}{q_{Ni}} = f\left(\frac{\delta_i}{\delta_r}, d\right) \qquad (1.2)$$

gdzie:

q_i - wychód i-tej frakcji ze wzbogacalnika,
q_{Ni} - zawartość i-tej frakcji w nadawie,
d - średni wymiar ziarn badanej frakcji.

Poszczególne rodziny krzywych (1.2) wyznaczono doświadczalnie. Tak skonstruowany model pozwala na symulację procesu wzbogacania w następujących maszynach:

- wzbogacalnikach zawiesinowych,
- hydrocyklonach,
- osadzarkach,
- stołach koncentracyjnych,
- flotownikach.

Modele o stałych rozłożonych zostały opracowane przede wszystkim dla osadzarki. W osadzarce wyodrębniono dwa procesy zachodzące w każdym jej punkcie:

- proces dyfuzji,
- proces transportu.

Jedną z możliwych metod opisu procesów o stałych rozłożonych, zawierających procesy dyfuzji i transportu, jest równanie Einsteina-Folkera [19].

Inny sposób analizy pracy osadzarki jako układu o stałych rozłożonych przedstawiono w [45]. Osadzarkę potraktowano tu jako wektorowe pole przypadkowe.

1.2. Matematyczny opis węgla surowego

Wykorzystanie modeli procesów wzbogacania przedstawionych w poprzednim punkcie jest uzależnione od danych węgla surowego. Bazują one na znajomości danych densymetrycznych, zapopielenia frakcji i składu ziarnowego. Wyznaczenie danych w oparciu o klasyczne metody wymaga dużego nakładu pracy. Jedną z metod uproszczonego ich otrzymywania jest opis matematyczny węgla surowego w ten sposób, aby istniała możliwość rekonstrukcji szczegółowego opisu jego struktury fizycznej w oparciu o minimum informacji, tj. w oparciu o wyniki badań w minimalnym zakresie. Ma to istotne znaczenie ze względu na wymaganą szybkość i pracochłonność wykonywania potrzebnych analiz laboratoryjnych.

W Ukraińskim Instytucie Wzbogacania Węgla [50] opracowano modele wyznaczania wychodu, zapopielenia i zasiarczenia przy rozdziale węgla surowego na sitach. Opis matematyczny składu densymetryczno-popiołowego przedstawiono w pracach [16,17,18].

1.3. Identyfikacja procesów wzbogacania

Dla opisania procesu wzbogacania należy znać model matematyczny nadawy i wzbogacalnika. Parametry modelu matematycznego wzbogacalnika w długim okresie nie ulegają zmianie, natomiast zmienna jest nadawa. Wynika stąd, że przy sterowaniu głównym problemem identyfikacji jest określenie parametrów opisu matematycznego nadawy. Wyznaczenie parametrów modelu krzywej wzbogacalności węgla surowego zawarte jest w pracach [17 i 18]. Autorzy tych prac podają sposób wyznaczania parametrów modelu w oparciu o pomiary densymetryczne i zapopielenie frakcji dla dwóch wartości gęstości rozdziału.

Inny sposób opisu statyki procesu wzbogacania węgla przedstawiony jest w pracach [53,54]. Autorzy tych prac postulują opisanie charakterystyki statycznej elementarnego procesu wzbogacania w postaci wielomianu:

$$\gamma = a_o + a_1\delta + a_2\delta^2$$

$$\lambda = b_o + b_1\delta + b_2\delta^2$$

gdzie:

γ, λ - wychód koncentratu i jego zapopielenie,
$a_o, a_1, a_2, b_o, b_1, b_2$ - współczynniki stałe,
δ - gęstość cieczy ciężkiej.

W pracy [53] proponuje się wyznaczać parametry metodą aproksymacji stochastycznej, opierając się na pomiarach wykonywanych automatycznie, za pomocą zainstalowanych czujników natężenia strug dopływu nadawy i odpływu produktów wzbogacania oraz ich zapopielenia, przy celowych zmianach zmiennych sterujących (δ).

1.4. Zagadnienie struktury sterowania

W pracach [10,22,52] zostały przedstawione różne koncepcje struktury sterowania procesami wzbogacania węgla. W pracach [22,52] proponuje się strukturę dwupoziomową: układy automatyki lokalnej na najniższy stopniu hierarchicznym oraz na wyższym - urządzenie ustalające wartości zadane regulatorów automatyki lokalnej. Dla wyznaczenia optymalnych wartości zadanych w pracy [10] zakłada się znajomość charakterystyk nadawy (należy się

zatem spodziewać, że układ sterowania musi opierać się na układzie identyfikacji nadawy). W pracy [22] założono, że dane do optymalizacji uzyskuje się drogą identyfikacji poszczególnych elementarnych procesów wzbogacania.

1.5. Cele i tezy pracy

Na podstawie przedstawionego przeglądu literatury dotyczącej zagadnień związanych ze sterowaniem procesami wzbogacania węgla można stwierdzić, że zarysowują się ogólnie dwie koncepcje struktury sterowania. W jednej podstawą do wyznaczania optymalnych nastaw jest znajomość parametrów opisu matematycznego nadawy, przy czym zakłada się, że modele poszczególnych maszyn nie ulegają zmianie (np. uogólnione charakterystyki wzbogacania poszczególnych maszyn). Dla tak przyjętej koncepcji musi być opracowany system identyfikacji nadawy.

W drugiej natomiast koncepcji jako podstawę wyznaczania optymalnych nastaw maszyn zakłada się znajomość modelu matematycznego poszczególnych procesów wzbogacania, przy czym model ten podaje zależność zmiennych wyjściowych, takich jak wychody i zapopielenie produktów, w funkcji zmiennych sterujących i model ten jest zależnością wypadkową własności nadawy i maszyny wzbogacającej.

Dla tak przyjętej koncepcji potrzebne informacje dla wyznaczania parametrów modelu uzyskuje się drogą pomiarów potrzebnych wielkości, przy zastosowaniu czujników zainstalowanych na wyjściu każdej maszyny. Tak rozumiana identyfikacja procesów wzbogacania nie została dotychczas opracowana. Problem opracowania prostych modeli matematycznych do opisu własności tych procesów jest dotychczas otwarty.

Jaka z powyższych koncepcji sterowania jest lepsza, trudno na podstawie obecnego stanu wiedzy przewidzieć. System oparty na pierwszej koncepcji musi posiadać system identyfikacji nadawy i dokładną znajomość charakterystyk maszyn wzbogacających. Jak będzie wynikało z dalszych rozważań, modele dotychczas opracowane nie są dostatecznie uzasadnione. Duże oprzyrządowanie systemu sterowania przy zastosowaniu drugiej koncepcji może również stanowić poważny problem.

Ponieważ system optymalnego sterowania powinien automatycznie wyznaczać optymalne nastawy maszyn wzbogacających w zależności od zmian parametrów nadawy, konieczna jest również znajomość dynamiki jej zmian. Zagadnienie to wymaga jednak długotrwałych badań i ze względu na dużą pracochłonność oraz duże koszty problemy te są przebadane tylko fragmentarycznie.

Uzyskane pozytywne wyniki dotychczas opracowanych czujników: zapopielenia, wilgotności, wartości opałowej [9,11] stwarzają możliwość przystosowania ich do współpracy z systemem w oparciu o drugą koncepcję sterowania.

Przeprowadzone w pracy badania dotyczyły podstawowych zagadnień związanych z tą koncepcją. Celem ich było opracowanie dwuparametrowych statycznych modeli trójproduktowego wzbogacalnika zawiesinowego podających zależność wychodu i zapopielenia koncentratu od gęstości cieczy ciężkiej, zależność wychodu koncentratu trójproduktowej osadzarki od jego zapopielenia, opracowanie metody identyfikacji przyjętych modeli, określenie wpływu parametrów czujników oraz sposobów pomiarów na dokładność identyfikacji, wykazanie celowości optymalizacji nastaw maszyn wzbogacających i doboru optymalnego sposobu mieszania.

Tezy pracy związane są ściśle z przedstawionymi wyżej celami i można je sformułować następująco:

- dla opracowania dwuparametrowego statycznego modelu wzbogacalnika zawiesinowego i osadzarki celowe jest przyjęcie zbioru funkcji podanych w postaci analitycznej sugerowanych przez różnych autorów i w oparciu i analizę oraz przyjęte kryterium wyboru wybrać model najbardziej odtwarzający rzeczywistą charakterystykę wzbogacalnika,
- za pomocą symulacji komputerowej można ustalić wpływ parametrów czujników pomiarowych (wag taśmowych, zapopielenia węgla), sposobu i czasu pojedynczych pomiarów, liczby pomiarów, czasu identyfikacji, probabilistycznych parametrów nadawy na dokładność wyznaczania współczynników regresji, jak również na wstępne ustalenie tych wielkości dla zaprojektowania potrzebnego oprzyrządowania,
- istnieje celowość optymalizacji poszczególnych procesów technologicznych poprzez optymalny dobór nastaw maszyn wzbogacających i optymalny sposób mieszania produktów wzbogacania, przy czym optymalne nastawy maszyn i optymalny sposób mieszania zależą od charakterystyk nadawy przychodzącej na zakład przeróbczy, narzuconych wymogami dotyczącymi jakości i ilości produktów końcowych. Optymalny sposób mieszania staje się istotny w przypadku konieczności jednoczesnej produkcji koncentratów o różnych parametrach jakościowych.

2. STATYCZNE MODELE PROCESÓW WZBOGACANIA WE WZBOGACALNIKACH Z CIECZĄ CIEŻKĄ I W OSADZARKACH

2.1. Wstęp

Wychody produktów wyjściowych wzbogacalników i ich jakość są funkcjami przyjętych zmiennych sterujących układu technologicznego. Dla trójproduktowego separatora zawiesinowego w stanie ustalonym wychody produktów wzbogacania i ich zapopielenie są funkcjami gęstości cieczy ciężkiej wzbogacania wstępnego δ_1 i wtórnego δ_2. Ogólnie można to zapisać:

$$\gamma_k = \frac{x_k}{x_N} = f_k(\delta_1) \tag{2.1}$$

$$\lambda_k = \varepsilon_k(\delta_1) \tag{2.2}$$

$$\gamma_p = \frac{x_p}{x_N} = f_p(\delta_1, \delta_2) \tag{2.3}$$

$$\lambda_p = \varepsilon_p(\delta_1, \delta_2) \tag{2.4}$$

gdzie:

γ_k, γ_p - wychód koncentratu i półproduktu,
λ_k, λ_p - zapopielenie koncentratu i półproduktu,
x_k, x_p - natężenie strugi wypływu koncentratu i półproduktu,
x_N - natężenie strugi dopływu nadawy.

W osadzarkach natomiast nie jest możliwe tak bezpośrednie ustalenie gęstości rozdziału jak we wzbogacalnikach zawiesinowych (gdzie ciężar właściwy rozdziału jest w przybliżeniu równy ciężarowi właściwemu cieczy ciężkiej). Zarysowują się jednak coraz bardziej możliwości regulacji zapopielenia produktów wzbogacania za pomocą automatycznych układów [34]. Dlatego też charakterystyki statyczne osadzarki przedstawiono w postaci:

$$\gamma_k = \gamma_k(\lambda_k) \tag{2.5}$$

Na przebiegi funkcji (2.1) - (2.4) i (2.5) ma wpływ nadawa i charakterystyki rozdziału maszyny wzbogacającej. Wpływ nadawy wyraża się poprzez jej skład densymetryczny i zapopielenie poszczególnych frakcji.

Dla wyznaczenia optymalnych warunków wzbogacania, co będzie wykazane w rozdziale 5, konieczna jest analityczna znajomość wymienionych zależności, czyli istnieje potrzeba opracowania statycznego modelu procesu dla podanych maszyn. W tej pracy funkcji (2.1), (2.2), (2.5) będzie się szukać w zbiorze przyjętych wzorów empirycznych w postaci:

$$y = f(u, b_0, b_1) \tag{2.6}$$

gdzie:

u - zmienna sterująca (np. gęstość cieczy ciężkiej lub zapopielenie koncentratu osadzarki),
b_0, b_1 - parametry wzoru empirycznego.

Zbiór rozpatrywanych wzorów empirycznych przedstawiono w tablicy 2.1. Ograniczenie się do dwuparametrowych wzorów empirycznych podyktowane jest tym, że modele matematyczne służące do sterowania procesami powinny charakteryzować się z jednej strony wystarczającą dokładnością, a z drugiej - możliwie dużą prostotą. Przy zależnościach dwuparametrowych dla wyznaczania parametrów wystarcza znajomość zmiennej zależnej w dwu punktach, co - jak będzie wykazane w rozdziale 5 - we wzbogacalnikach trójproduktowych daje się łatwo zrealizować. Dla analizy badanych wzorów empirycznych i wyboru najlepszego konieczna jest znajomość danych doświadczalnych zależności (2.1), (2.2), (2.5). Przyjmując następnie kryterium oceny aproksymacji można ustalić, który z przyjętych wzorów empirycznych najlepiej odtwarza szukaną charakterystykę statyczną. Jako dane do wyboru najlepszego wzoru empirycznego przyjęto wyniki analizy densymetrycznej węgla surowego KWK Knurów - z około 10 pokładów w następujących klasach ziarnowych: 250-80 mm, 80-30 mm, 30-0 mm oraz półproduktów kruszonych do klasy 10-0 mm. Dane te zostały przeliczone za pomocą empirycznego modelu procesu wzbogacania [12] we wzbogacalniku cieczy ciężkiej i w osadzarce. Pozwoliło to na uzyskanie wyników, które reprezentowały zależność wychodu i zapopielenia koncentratu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej we wzbogacalniku zawiesinowym:

$$\gamma_k^m = f_k^m(\delta_1) \tag{2.7}$$

$$\lambda_k^m = \varepsilon_k^m(\delta_1) \tag{2.8}$$

oraz wychodu koncentratu funkcji zapopielenia w osadzarce

$$\gamma_k^n = f^n(\lambda_k^n) \tag{2.9}$$

Tablica 2.1

Postacie funkcyjne wzorów empirycznych do aproksymacji zależności wychodów i zapopielenia koncentratu funkcji gęstości cieczy ciężkiej przy wzbogacaniu w wzbogacalniku zawiesinowym oraz zależności wychodu koncentratu od jego zapopielenia przy wzbogacaniu w osadzarkach

Numer wzoru	Postać funkcyjna wzoru
1	$b_o + b_1 u$
2	$b_o + b_1/u$
3	$b_o + b_1 \ln u$
4	$b_o + b_1 \operatorname{artg} u$
5	$b_o u + b_1 \ln u$
6	$b_o u + b_1 \ln u$
7	$b_o u + b_1 \operatorname{artg} u$
8	$b_o u + b_1/u$
9	$b_o u + b_1 \operatorname{arotg} u$
10	$b_o \ln u + b_1 \operatorname{arotg} u$
11	$b_o u + b_1 u^2$
12	$b_o + b_1/u^2$
13	$b_o + b_1 \ln^2 u$
14	$b_o + b_1 u \ln u$
15	$b_o + b_1 u \operatorname{arotg} u$
16	$b_o u^{b_1}$
17	$b_o b_1^u$
18	$1/(b_o + b_1 u)$
19	$u/(b_o + b_1 u)$
20	$\operatorname{arotg} \frac{u + b_o}{b_1}$

gdzie:

γ_k^{m} - empiryczna wartość wychodu koncentratu badanego wzbogacalnika,

λ_k^{m} - empiryczna wartość zapopielenia koncentratu.

Zależności $f_k^{\mathrm{m}}(\delta_1)$ jak $\varepsilon_k^{\mathrm{m}}(\delta_1)$ podane zostały w postaci dyskretnej w zakresie $1.4.10^3$ - $1.84.10^3$ $\frac{kg}{m^3}$ co $0{,}02.10^3$ $\frac{kg}{m^3}$, a więc w dwudziestu trzech punktach. W ten sposób uzyskano dane do dalszej analizy uwzględniające własności nadawy (wyniki analizy densymetrycznej węgla surowego z różnych pokładów) oraz własności wzbogacalnika (poprzez obliczenia wykonane za pomocą empirycznego modelu).

Jako metodę wyboru parametrów b_1 i b_2 i oceny dokładności rozpatrywanego wzoru przyjęto metodę najmniejszych kwadratów. W myśl tej metody za optymalne parametry b_o i b_1 uważa się te, dla których suma kwadratów odchyleń S dla wychodów:

$$S_\gamma = \min_{b_o, b_1} \sum_{i=1}^{n} \left[f_k^{\mathrm{m}}(\delta_1) - f_k(b_o, b_1, \delta_{11}) \right]^2 \qquad (2.10)$$

i dla zapopielenia:

$$S_\lambda = \min_{b_o, b_1} \sum_{1}^{n} \left[\varepsilon_k^{\mathrm{m}}(\delta_{11}) - \varepsilon_k(b_o, b_1, \delta_{11}) \right]^2 \qquad (2.11)$$

gdzie:

n - liczba punktów pomiarowych.

Metoda najmniejszych kwadratów ma tę zaletę, że jeśli suma kwadratów odchyleń jest mała, to wartość tych odchyleń jest także mała. Sumę S_γ i S_λ przyjęto jako kryterium dokładności odtwarzania charakterystyki statycznej przez dany wzór empiryczny.

2.2. Wybór wzorów empirycznych do aproksymacji charakterystyk statycznych wzbogacalnika z cieczą ciężką

Ocenę przydatności wzorów do aproksymacji charakterystyk statycznych przeprowadzono dla wzbogacalnika w dwóch klasach ziarnowych: 250-80 oraz 80-30 mm. Za pomocą maszyny cyfrowej wykonano obliczenia sumy kwadratów odchyleń (2.10) i (2.11) zgodnie z wytycznymi i ustaleniami we wstępie tego rozdziału.

Tablica 2.2

Wartości sumy kwadratów uchybów przy aproksymacji zależności wychodu koncentratu od gęstości cieczy ciężkiej dla różnych nadaw w klasie ziarnowej 250-80 mm za pomocą wzorów empirycznych

Numer wzoru empir.	Numer kolejny nadawy									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6.11	1.43	18.38	812.6	286.1	2.218	20.72	38.12	4.71	58.83
2	12.3	1.11	12.11	817.4	249.2	3.018	15.69	33.73	6.97	56.39
3	8.79	1.259	15.05	814.8	267.6	2.569	18.1	35.9	5.25	57.61
4	10.2	1.188	13.69	815.8	259.8	2.75	17	35.02	4.5	57.08
5	9.23	2.1	18.47	813.5	275.5	1.867	19.69	41.68	4.87	57.85
6	10.02	4.69	25.76	811.7	289.3	1.849	22.77	52.98	11.87	58.26
7	4.45	0.725	14.58	813.1	283.4	3.686	19.47	30.89	2.89	59.11
8	8.03	2.81	22.1	812.1	288.04	1.68	21.81	45.69	8.36	58.54
9	11.45	1.299	13.55	816.3	255.9	2.62	16.53	35.69	5.07	56.76
10	8.64	1,04	13.9	813.2	264.9	2.92	17.54	34.12	4.26	57.52
11	3.67	0.7634	12.04	812.5	281.1	5.313	18.53	26.66	2.01	59.28
12	16.6	0.993	9.6	820.6	230.9	3.357	13.45	31.47	4.129	55.19
13	3.95	1.647	22.46	810.4	307.8	1.918	23.81	40.74	5.699	60.22
14	4.75	1.566	20.84	811.4	298.6	0.03	22.59	39.67	5.517	59.65
15	5.72	1.466	18.99	812.3	289.3	2.166	21.19	38.57	5.32	59.04
16	0.029	$0.5329.10^{-3}$	0.0043	2.52	0.125	$0.795.10^{-3}$	0.0202	0.0097	0.0017	5.03
17	0.0171	$0.607.10^{-6}$	0.00526	2.522	0.133	$0.689.10^{-3}$	0.023	0.0102	0.00187	5.01
18	$0.338.10^{-3}$	$0.2569.10^{-3}$	$0.151.10^{-5}$	0.0121	$0.636.10^{-4}$	$0.214.10^{-6}$	$0.259.10^{-4}$	$0.277.10^{-5}$	$0.666.10^{-6}$	0.011
19	$0.146.10^{-3}$	$0.1989.10^{-6}$	$0.1014.10^{-5}$	0.0122	0.5725	$0.288.10^{-6}$	$0.1992.10^{-4}$	$0.246.10^{-5}$	$0.573.10^{-6}$	0.011
20	97.12	$0.1986.10^{-6}$	336.7	61.43	105.6	$0.978.10^{5}$	$0.354.10^{6}$	$0.66.10^{5}$	47.83	25960

2.2.1. Aproksymacja charakterystyki wychodu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej

Otrzymane wyniki sumy kwadratów odchyleń są dla różnych wzorów empirycznych (tablica 2.1) obliczono dla danych z 10 pokładów KWK "Knurów" w klasie ziarnowej 250-80 przedstawiono w tablicy 2.2. W tablicy 2.3 natomiast podano numery wzorów empirycznych charakteryzujących się najmniejszymi wartościami sumy kwadratów odchyleń. Jak można zauważyć, wzór o numerze 12 najczęściej zajmuje pierwsze miejsce, a więc najczęściej i najwierniej odtwarza charakterystykę statyczną wychodu koncentratu funkcji gęstości cieczy ciężkiej wzbogacalnika zawiesinowego.

Tablica 2.3

Numery wzorów empirycznych i najmniejsze wartości sumy kwadratów uchybów przy aproksymacji zależności wychodu koncentratu od cieczy ciężkiej w klasie ziarnowej 250-80 mm

Lp.	Numer kolejny nadawy									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	11 3.67	7 0.725	12 9.6	13 810.4	12 230.9	8 1.681	12 13.45	11 26.66	11 2.01	12 55.19
2	13 3.95	11 0.763	11 12,04	14 811.4	2 249.2	6 1.849	2 15.65	7 30.89	7 2.89	2 56.39
3	7 4.45	12 0.9934	2 12.11	6 811.7	9 255.9	5 1.805	9 16.63	12 31.47	12 4.1	9 56.76

Tablica 2.4

Numery wzorów empirycznych i najmniejsze wartości sumy kwadratów uchybów przy aproksymacji zależności wychodu od gęstości cieczy ciężkiej w klasie ziarnowej 80-30 mm

Lp.	Numer kolejny nadawy									
	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	12 181.5	12 253.9	12 188.9	12 40.07	12 44.62	12 193.8	12 119.6	12 395.2	12 227.1	12 438.8
2	2 214.7	2 299.9	2 217.8	2 53.7	2 56.3	2 219.2	2 137.2	2 676.5	2 264.3	2 548.5
3	4 234.5	9 313.2	9 226.4	9 57.4	9 59.48	9 229.4	9 142.3	9 700.6	9 275.2	9 577.9

W tablicy 2.4 przedstawiono otrzymane wyniki obliczeń wartości sumy kwadratów odchyleń od nadawy z dziesięciu pokładów kopalni Knurów w klasie ziarnowej 80-30 mm dla wzorów empirycznych charakteryzujących się najmniejszą wartością przyjętego kryterium aproksymacji. I tu wzór o numerze 12 najlepiej aproksymuje charakterystykę wychodu koncentratu funkcji gęstości cieczy zawiesinowej. Również wzory o numerach 2 i 9 charakteryzują się dobrymi przybliżeniami aproksymowanych charakterystyk.

2.2.2. Aproksymacja charakterystyki zapopielenia koncentratu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej

Otrzymane wyniki obliczeń dla wzorów empirycznych charakteryzujących się najmniejszą wartością sumy kwadratów odchyleń S_λ (2.11) dla danych z 10 pokładów KWK Knurów w klasie ziarnowej 250-80 mm przedstawiono w tablicy 2.5. Wzory o numerach 12 i 2 najlepiej odtwarzają charakterystykę za-

Tablica 2.5

Numery wzorów empirycznych i najmniejsze wartości sumy kwadratów uchybów przy aproksymacji zależności zapopielenia koncentratu od gęstości cieczy ciężkiej w klasie ziarnowej 250-80 mm

Lp.	Numer kolejny nadawy									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10 13.51	11 0.0774	11 0,436	12 1.677	12 5.502	13 1.231	12 1.135	12 1.093	11 0.0556	12 4.183
2	3 15.51	12 0.0827	2 0.542	2 2.047	2 6.058	11 1.284	2 1.35	2 1.19	7 0.0813	2 4.89
3	5 13.72	2 0.0888	8 0.581	9 2.159	9 6.275	19 1.323	9 1.437	16 1.191	11 0.0916	9 5.105

Tablica 2.6

Numery wzorów empirycznych i najmniejsze wartości sumy kwadratów uchybów przy aproksymacji zależności zapopielenia koncentratu od gęstości cieczy ciężkiej w klasie ziarnowej 80-30 mm

Lp.	Numer kolejny nadawy								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	11 0.776	6 0.241	12 0.133	2 0,267	5 0,2806	15 0,3849	13 0.2447	15 1.753	7 0.716
2	13 0.754	8 0.2410	2 0.1614	9 0.2684	3 0.281	1 0.3862	14 0.2614	1 1.761	14 0.7209
3	7 0.845	5 0.2414	9 0.1748	4 0.2726	6 0.2816	7 0.388	11 0.269	14 1.814	13 0.7212

popielenia koncentratu funkcji gęstości cieczy zawiesinowej wzbogacalnika. Dla klasy ziarnowej 80-30 mm otrzymane wyniki przedstawiono w tablicy 2.6. W tym przypadku trudno wyłonić najlepszy wzór, dający w każdym przypadku najlepsze przybliżenie. Jednak wzory o numerach 2, 7, 11 najczęściej występują w pierwszej trójce.

2.3. Wybór wzorów empirycznych do aproksymacji charakterystyki osadzarki

W pierwszym etapie badań dotyczących postaci funkcyjnej zależności $f(\lambda_k)$ przyjęto wzory empiryczne przedstawione w tablicy 2.1. Podobnie jak dla wzbogacalnika zawiesinowego wykonano analizę tych wzorów dla 10 pokładów KWK Knurów. Otrzymane wyniki dla węgla surowego w klasie 30-10 mm dla wzorów empirycznych, które najlepiej aproksymują charakterystykę statyczną wzbogacalnika przedstawiono w tablicy 2.7 . Jak widać, dla każdego pokładu

Tablica 2.7

Numery wzorów empirycznych i najmniejsze wartości sumy kwadratów uchybów przy aproksymacji zależności wychodu koncentratu od jego zapopielenia przy wzbogacaniu nadawy w osadzarce w klasie ziarnowej 30-0,1 mm

Lp.	Numer kolejny nadawy									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	12 494	12 478	12 417	12 390	12 310	12 198	12 207	12 300	12 500	12 230
2	2 578	2 549	2 496	2 467	2 388	2 253	2 278	2 368	2 572	2 285
3	9 580	9 550	9 496	9 467	9 388	9 253	9 278	9 368	9 573	9 285

Tablica 2.8

Numery wzorów empirycznych i najmniejsze wartości sumy kwadratów odchyleń przy aproksymacji zależności wychodu koncentratu od jego zapopielenia przy wzbogacaniu nadawy w osadzarce w klasie ziarnowej 10-0,1 mm

Lp.	Numer kolejny nadawy							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	12 90.9	12 26.2	12 94	12 38.9	12 27.5	12 30.2	12 26.6	12 140.5
2	2 114.7	2 40.7	9 124.9	9 38.9	9 43.6	9 45.6	9 43.7	2 195.5
3	9 114.9	9 40.7	2 124.9	2 38.9	2 43.6	2 45.6	2 43.7	9 195.7

wzory o numerach 12, 2 i 9 najlepiej aproksymują charakterystykę statyczną osadzarki. W tablicy 2.8 przedstawiono jak wyżej wyniki obliczeń sumy kwadratów odchyleń przy aproksymacji charakterystyki statycznej dla ośmiu pokładów węgla surowego w postaci przyrostu kruszonego do klasy 10-0,1 mm. Podobnie jak w poprzednim przypadku wzory o numerach 12, 2, 9 najlepiej aproksymują charakterystykę statyczną dla rozpatrywanej klasy nadawy.

Otrzymane wyniki z analizy zbioru wzorów empirycznych (tabl.2.1) wskazują, że zależności o postaci

$$\gamma_k = b_o + \frac{b_1}{\lambda_k^n} \qquad (2.12)$$

gdzie:

n - wykładnik potęgi n = 1,2,

najlepiej aproksymowały charakterystyki osadzarki. Przeprowadzono więc badania dla wzorów empirycznych (tablica 2.9) w postaci (2.12) przy różnych wartościach n. Otrzymane wyniki obliczeń sumy kwadratów odchyleń dla nadawy o numerze 6 i 7 przedstawiono w tablicy 2.10. Suma kwadratów odchyleń maleje ze wzrostem n do wartości 9. Gdy n = 9 suma kwadratów odchyleń jest minimalna, a dla $n > 9$ znowu staje się większa.

Tablica 2.9

Postacie funkcyjne wzorów empirycznych typu

$$y = b_o + b_1/u^n$$

Numer wzoru	Postać funkcyjna wzoru
1	$b_o + b_1/u$
2	$b_o + b_1/u^{1.5}$
3	$b_o + b_1/u^2$
4	$b_o + b_1/u^{2.5}$
5	$b_o + b_1/u^3$
6	$b_o + b_1/u^{3.5}$
7	$b_o + b_1/u^4$
8	$b_o + b_1/u^{4.5}$
9	$b_o + b_1/u^5$
10	$b_o + b_1/u^{5.5}$
11	$b_o + b_1/u^{6.0}$
12	$b_o + b_1/u^7$
13	$b_o + b_1/u^8$
14	$b_o + b_1/u^9$
15	$b_o + b_1/u^{9.5}$
16	$b_o + b_1/u^{10}$

Tablica 2.10

Wartości sumy kwadratów uchybów przy aproksymacji zależności wychodu koncentratu od jego zapopielenia wzorami empirycznymi podanymi w tablicy 3.14 dla nadawy o numerze 6 i 7 w klasie ziarnowej 30-10 mm

Numer wzoru empirycznego	Numer nadawy	
	6	7
1	253.4	27.8
2	224.7	241.3
3	198.6	207.2
4	175.2	175.6
5	154.3	146.8
6	135.8	120.7
7	119.7	97.38
8	105.8	76.79
9	94,01	58.96
10	84.08	43.84
11	75.92	31.39
12	64.27	14.21
13	57.92	67.5
14	55.85	8.17
15	-	11.92
16	21.38	17.5

Tablica 2.11

Wyniki obliczeń sumy kwadratów odchyleń przy aproksymacji charakterystyki statycznej wybranymi wzorami empirycznymi podanymi w tablicy 3.14

Numer wzoru	Kolejny numer nadawy									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	578.4	549.6	495.9	466.8	388	253.4	278	368	572.6	285.2
3	494.8	478.4	417.1	390	310	198.6	207.2	300	500	230.6
13	174.6	177.3	112	95.7	67.6	57.9	6.7	81.1	157	81.6
14	139	146.7	86.1	71.6	56.3	55.8	8.1	67.5	125.2	75.7
15	123	133	75	61.6	52.9	-	11.9	62.3	111.3	73.9
16	108	120	65.5	52.9	2764	2138	17.5	58.1	98.8	1782

W tablicy 2.11 podano wyniki obliczeń sumy kwadratów odchyleń przy aproksymacji charakterystyki statycznej niektórymi wzorami empirycznymi z tablicy 2.9. Potwierdza się fakt, że ze wzrostem wykładnika potęgi n do wartości nawet 10, aproksymacja tymi wzorami jest dokładniejsza.

2.4. Uwagi i wnioski dotyczące opracowanych modeli statycznych

Przy opracowywaniu statycznych modeli procesów wzbogacania zastosowano jedną z metod wyboru wzoru empirycznego z wybranego zbioru na podstawie danych doświadczalnych. Taka metoda jest często stosowana [13, 36] wtedy, kiedy nie istnieje teoria uwzględniająca przyjęcie szukanych zależności, co ma miejsce w procesach wzbogacania węgla. Zbiór funkcji dwuparametrowych ustalony został w oparciu o podane w literaturze [13] wzory najczęściej spotykanych zależności dwuparametrowych oraz własne koncepcje autora.

Zasadniczo udało się z ustalonego zbioru zależności wybrać wzory najlepsze, szczególnie dla procesu wzbogacania w osadzarce. Wybrane jako najlepsze z przyjętego zbioru wzory dotyczyły jednak danych nadawy z pokładów KWK Knurów. Ponieważ nie wykonano badań w tym zakresie dla węgli z innych kopalń, nie można wyciągnąć wniosków o ich uniwersalności. Wydaje się zatem słuszne przeprowadzenie dalszych badań w tym zakresie.

Można utworzyć dalsze wzory dla aproksymacji charakterystyk statycznych wzbogacalników i rozszerzyć przez to zbiór funkcji, jednak wydaje się, że problem nie polega zasadniczo na znalezieniu wzoru najdokładniej aproksymującego wymaganą zależność, lecz wzoru, który dostatecznie dokładnie ją aproksymuje.

Dyskusyjne może być również stosowanie kryterium oceny dokładności aproksymacji w postaci sumy kwadratów odchyleń. Istnieje wiele innych kryteriów oceny [13], przyjęcie jednak metody sumy kwadratów uchybów preferuje wybór wzorów odtwarzających kształt aproksymowanej zależności w całym badanym zakresie jej zmienności.

3. DYNAMICZNE MODELE PROCESÓW WZBOGACANIA

3.1. Dwustrefowy model wzbogacalnika z cieczą ciężką

Proces wzbogacania charakteryzuje się ciągłym przepływem masy przez urządzenie wzbogacające. Czynnikiem powodującym rozdział jest gęstość cieczy ciężkiej; ziarna o ciężarze właściwym większym od ciężaru właściwego cieczy zawiesinowej opadają w dół, natomiast ziarna o ciężarze właściwym mniejszym przemieszczają się w kierunku do powierzchni cieczy. Tworzą się dwie strefy: strefa koncentratu o zasobie chwilowym V_K oraz strefa odpadów o zasobie chwilowym V_o. Na rys. 3.1 pokazano schemat blokowy procesu wzbogacania w dwuproduktowym wzbogacalniku z cieczą ciężką z wyróżnieniem dwóch stref.

Rys. 3.1. Schemat blokowy procesu wzbogacania w dwuproduktowym wzbogacalniku z cieczą ciężką z wyróżnieniem dwóch stref

Zakłada się, że nadawę dzieli się na I frakcji o średniej gęstości δ_i. Ilość M_{Ki} i-tej frakcji ciężarowej zawarta w koncentracie i w odpadach M_{oi} można wyrazić wzorami:

$$M_{Ki} = V_K z_{Ki} \tag{3.1}$$

$$M_{oi} = V_o z_{oi} \tag{3.2}$$

gdzie:

z_{Ki} - zawartość (koncentracja) i-tej frakcji w koncentracie,

z_{oi} - zawartość (koncentracja) i-tej frakcji w odpadach.

Zmianę ilości i-tej frakcji w strefie koncentratu na skutek jej przepływu można wyrazić wzorem:

$$dM_{Ki} = d(V_K \cdot z_{Ki}) = dV_K \cdot z_{Ki} + dz_{Ki} \cdot V_K \tag{3.3}$$

a w strefie odpadów:

$$dM_{oi} = d(V_o \cdot z_{oi}) = dV_o \cdot z_{oi} + dz_{oi} \cdot V_o \tag{3.4}$$

Przyjmując, że szybkość wypływu ziaren jest proporcjonalna do wielkości zasobu strefy, można napisać wzory:

$$q_{Ki} = D_K \cdot V_K \cdot z_{Ki} \tag{3.5}$$

$$q_{oi} = D_o \cdot V_o \cdot z_{oi} \tag{3.6}$$

gdzie:

$D_K \cdot V_K$ - ilość koncentratu wypływającego w jednostce czasu,

$D_o \cdot V_o$ - ilość odpadów wypływających w jednostce czasu,

q_{Ki} - ilość i-tej frakcji wypływającej ze strefy koncentratu w jednostce czasu,

q_{oi} - ilość i-tej frakcji wypływającej ze strefy odpadów w jednostce czasu.

Przy tych założeniach równania bilansu mas przepływających przez strefy są następujące:

$$\frac{dV_o}{dt} \cdot z_{oi} + V_o \frac{dz_{oi}}{dt} = -V_o s_i z_{oi} - D_o V_o z_{oi} + w_i V_K z_{Ki} + Q_i \tag{3.7}$$

$$\frac{dV_K}{dt} \cdot z_{Ki} + V_K \frac{dz_{Ki}}{dt} = V_o s_i z_{oi} - V_K w_i z_{Ki} - D_K V_K z_{Ki} \tag{3.8}$$

$$\sum_{i=1}^{I} z_{oi} = 1 \tag{3.9}$$

$$\sum_{i=1}^{I} z_{Ki} = 1 \tag{3.10}$$

przy czym i = 1,2,.....I,

gdzie:

s_i, w_i - szybkość przepływu ziarn i-tej frakcji między strefami przypadająca na jednostkę ilości tej frakcji,

Q_i - natężenie dopływu ziarn i-tej frakcji do strefy odpadów.

Sumując stronami równania (3.7), (3.8) względem i oraz uwzględniając (3.9) i (3.10) uzyskuje się dwa dalsze równania w postaci:

$$\frac{dV_o}{dt} = -V_o \sum_{i=1}^{I} s_i z_{oi} + V_K \sum_{i=1}^{I} w_i z_{Ki} + \sum_{i=1}^{I} Q_i \tag{3.11}$$

$$\frac{dV_K}{dt} = V_o \sum_{i=1}^{I} s_i z_{oi} - V_K \sum_{i=1}^{I} w_i z_{Ki} - D_K \cdot V_K \tag{3.12}$$

Równania (3.7) - (3.12) tworzą nieliniowy układ równań różniczkowych opisujących zależność między sygnałami wejściowymi $Q_1, Q_2 \ldots\ldots, Q_I$ a wyjściem w postaci koncentracji poszczególnych frakcji w koncentracie z_{Ki}, odpadach z_{oi} oraz chwilowych zasobów V_o i V_K.

Korzystając z zależności (3.1) - (3,4) można układ równań (3.7)-(3.12) doprowadzić do postaci:

$$\frac{dM_{oi}}{dt} = - s_i M_{oi} - D_o M_{oi} + M_{Ki} w_i + Q_i \tag{3.13}$$

$$\frac{dM_{Ki}}{dt} = s_i M_{oi} - w_i M_{Ki} - D_K \cdot M_{Ki} \tag{3.14}$$

$$\frac{dV_o}{dt} = - \sum_{i=1}^{I} s_i M_{oi} - D_o V_o + \sum_{i=1}^{I} M_{Ki} w_i + \sum_{i=1}^{I} Q_i \tag{3.15}$$

$$\frac{dV_K}{dt} = \sum_{i=1}^{I} s_i M_{oi} - \sum_{i=1}^{I} w_i M_{Ki} - D_K V_K \tag{3.16}$$

Układ równań różniczkowych (3.13) - (3.16) jest układem liniowym. Ilość popiołu B_{Ki} w i-tej frakcji ziarnowej, znajdującą się w strefie koncentratu i w odpadach, można określić wzorami:

$$B_{Ki} = M_{Ki} \cdot \lambda_{Ki} \tag{3.17}$$

$$B_{oi} = M_{oi} \cdot \lambda_{oi} \tag{3.18}$$

gdzie:

λ_{Ki} - zapopielenie i-tej frakcji w koncentracie,

λ_{oi} - zapopielenie i-tej frakcji w odpadach.

Równania bilansu przepływu popiołu mają następującą postać:

$$\frac{dB_{oi}}{dt} = - B_{oi} B_i - D_o B_{oi} + w_i B_{Ki} + Q_i \cdot H_i \tag{3.19}$$

$$\frac{dB_{Ki}}{dt} = B_{oi} s_i - w_i B_{Ki} - D_t \cdot B_{Ki} \tag{3.20}$$

i = 1,2,....,I

gdzie:

H_i - chwilowa wartość zapopielenia i-tej frakcji strugi Q_i.

Chwilową wartość zapopielenia i-tych frakcji koncentratu λ_{Ki} i odpadów λ_{oi} uzyska się po rozwiązaniu układu równań (3.13) - (3.20) i podstawieniu otrzymanych wyników do następujących wzorów:

$$\lambda_{Ki} = \frac{B_{Ki}}{M_{Ki}} \tag{3.21}$$

$$\lambda_{oi} = \frac{B_{oi}}{M_{oi}} \tag{3.22}$$

Całkowite zapopielenie koncentratu λ_{CK} i odpadów λ_{CO} można uzyskać ze wzorów:

$$\lambda_{CK} = \frac{\sum_{1}^{I} B_{Ki}}{V_K} \tag{3.23}$$

$$\lambda_{CO} = \frac{\sum_{1}^{I} B_{oi}}{V_o} \tag{3.24}$$

3.1.1. Cyfrowy model procesu wzbogacania węgla w dwuproduktowym wzbogacalniku z cieczą ciężką

Po dokonaniu transformacji Laplace'a przy zerowych warunkach początkowych równań (3.13), (3.14) i przekształceniu otrzymamy:

$$\bar{M}_{oi} = \frac{\bar{B}_{Ki} w_i + \bar{Q}_i}{p + s_i + D_o} \tag{3.25}$$

$$\bar{M}_{Ki} = \frac{s_i \bar{B}_{oi}}{p + w_i + D_K} \tag{3.26}$$

gdzie:

$\bar{M}_{oi}$, $\bar{M}_{Ki}$, $\bar{Q}_i$ - transformaty Laplace'a przebiegów odpowiednio $M_{oi}(t)$, $M_{Ki}(t)$, $Q_i(t)$,

p - operator Laplace'a.

Jak więc widać, przebieg $M_{oi}(t)$ jest odpowiedzią układu inercyjnego na sumę sygnałów $w_i M_{Ki}$ i Q_i, podobnie $M_{Ki}(t)$ jest odpowiedzią na sygnał $s_i M_{oi}(t)$. Na podstawie [27] można napisać:

$$M_{oi}(n+1) = e^{-\frac{\Delta t}{T_{oi}}} \cdot M_{oi}(n) + T_{oi} \cdot (1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{oi}}}) Q_i(n) + w_i M_{Ki}(n) \tag{3.27}$$

$$M_{Ki}(n+1) = e^{-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}} M_{Ki}(n) + T_{Ki}(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}}) s_i \cdot M_{oi}(n) \tag{3.28}$$

gdzie:

$$T_{oi} = \frac{1}{s_i + D_o} \tag{3.29}$$

$$T_{Ki} = \frac{1}{w_i + D_K} \tag{3.30}$$

t - czas odpowiadający jednemu krokowi obliczeniowemu,

n - numer kolejnego kroku obliczeniowego.

Podobnie w oparciu o (3.15), (3.16) otrzymuje się:

$$V_K(n+1) = e^{-\frac{\Delta t}{T_{VK}}} V_K(n) + \frac{1}{D_K}(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{VK}}}) \sum_{i=1}^{I} s_i M_{oi}(n) + \sum_{i=1}^{I} w_i M_{Ki}(n) \tag{3.31}$$

$$V_o(n+1) = e^{-\frac{\Delta t}{T_{Vo}}} \cdot V_o(n) + \frac{1}{D_o}(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{Vo}}}) \sum_{i=1}^{I} Q_i(n) + \sum_{i=1}^{I} w_i M_{Ki} - \sum_{i=1}^{I} s_i M_{oi}(n) \tag{3.32}$$

gdzie:

$$T_{Vo} = \frac{1}{D_o} \tag{3.33}$$

$$T_{VK} = \frac{1}{D_K} \tag{3.34}$$

Podobnie można wyznaczyć ilość popiołu w kolejnych krokach według wzorów:

$$B_{oi}(n+1) = e^{-\frac{\Delta t}{T_{oi}}} B_{oi}(n) + \frac{1}{s_i + D_o}(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{oi}}}) H_i(n) Q_i(n) + w_i B_{Ki}(n) \tag{3.35}$$

$$B_{Ki}(n+1) = e^{-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}} B_{Ki}(n) + \frac{1}{w_i + D_K}(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}}) s_i B_{Ki}(n) \tag{3.36}$$

Natomiast wartość koncentracji frakcji i ich zapopielenie są równe:

$$z_{Ki}(n) = \frac{M_{Ki}(n)}{V_K(n)} \tag{3.37}$$

$$z_{oi}(n) = \frac{M_{oi}(n)}{V_o(n)} \tag{3.38}$$

$$\lambda_{Ki}(n) = \frac{B_{Ki}(n)}{M_{Ki}(n)} \tag{3.39}$$

$$\lambda_{oi}(n) = \frac{B_{oi}(n)}{V_o(n)} \tag{3.40}$$

Natężenia strug wyjściowych poszczególnych frakcji są równe:

$$q_{Ki}(n) = M_{Ki}(n) \cdot D_K \tag{3.41}$$

$$q_{oi}(n) = M_{oi}(n) \cdot D_o \tag{3.42}$$

Całkowite natężenie strug wyjściowych koncentratu Q_{cK} i odpadów Q_{co} oraz ich zapopielenie można obliczyć według wzorów:

$$Q_{cK}(n) = V_K(n) \cdot D_K \tag{3.43}$$

$$Q_{co}(n) = V_o(n) \cdot D_o \tag{3.44}$$

$$\lambda_{cK}(n) = \frac{\sum_{1}^{I} B_{Ki}(n)}{V_K(n)} \tag{3.45}$$

$$\lambda_{co}(n) = \frac{\sum_{1}^{I} B_{oi}(n)}{V_o(n)} \tag{3.46}$$

3.1.2. Analiza stanu ustalonego

W stanie ustalonym przy stałych wartościach Q_i równania (3.14) i (3.15) przyjmują następującą postać:

$$-s_i M_{oi} - D_o M_{oi} + M_{Ki} w_i + Q_i = 0 \tag{3.47}$$

$$s_i M_{oi} - w_i M_{Ki} - D_K M_{Ki} = 0 \tag{3.48}$$

Po ich przekształceniu wyznaczono stosunek ilości i-tej frakcji w strefie koncentratu i w odpadach do natężenia dopływu i-tej frakcji do wzbogacalnika:

$$\frac{M_{Ki}}{Q_i} = \frac{s_i}{s_i D_K + D_o w_i + D_o D_K} \tag{3.49}$$

$$\frac{M_{oi}}{Q_i} = \frac{w_i + D_K}{s_i D_K + D_o w_i + D_o D_K} \tag{3.50}$$

Mnożąc obustronnie równanie (3.49) przez D_K, a równanie (3.50) przez D_o, po uwzględnieniu (3.1), (3.2), (3.5), (3.6) i przekształceniu otrzymuje się:

$$\frac{q_{Ki}}{Q_i} = \frac{\frac{s_i}{D_o}}{\frac{s_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K} + 1} \tag{3.51}$$

$$\frac{q_{oi}}{Q_i} = \frac{\frac{w_i}{D_K} + 1}{\frac{s_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K} + 1} \tag{3.52}$$

Znając wartości stosunków w stanie ustalonym $\frac{q_{oi}}{Q_i}$, $\frac{q_{Ki}}{Q_i}$, na podstawie równań (3.51), (3.52) nie można wyznaczyć stosunków $\frac{s_i}{D_o}$, $\frac{w_i}{D_K}$, ponieważ równania te są zależne. Znając natomiast stosunek $\frac{w_i}{D_K}$ oraz $\frac{q_{Ki}}{Q_i}$ można wyznaczyć stosunek $\frac{s_i}{D_o}$:

$$\frac{s_i}{D_o} = \frac{\frac{q_{Ki}}{Q_i}\left(\frac{w_i}{D_K} + 1\right)}{1 - \frac{q_{Ki}}{Q_i}} = \frac{q_{Ki}}{q_{oi}}\left(\frac{w_i}{D_K} + 1\right) \tag{3.53}$$

Zakładając, że zjawisko dyfuzji ziarn ze strefy koncentratu do strefy odpadów jest do pominięcia, a więc $w = 0$, otrzymuje się:

$$\frac{s_i}{D_o} = \frac{\frac{q_{Ki}}{Q_i}}{1 - \frac{q_{Ki}}{Q_i}} = \frac{q_{Ki}}{q_{oi}}. \tag{3.54}$$

3.1.3. Współzależność parametrów modelu i uogólnionej charakterystyki wzbogacalnika

Jak wynika z (3.54), wartość stosunku $\frac{s_i}{D_o}$ jest funkcją $\frac{q_{Ki}}{Q_i}$. Dla znalezienia więc zależności $\frac{s_i}{D_o}$ od ciężaru właściwego cieczy zawiesinowej rozpatrzono najpierw taką zależność dla $\frac{q_{Ki}}{Q_i}$.

Analizę przeprowadzono w oparciu o metodę analizy wymiarowej [39]. W tym celu przeprowadzono następujące rozumowanie. Jeżeli na wzbogacalnik wprowadzona zostanie struga nadawy o natężeniu Q_i, gęstości ziaren δ_i o charakterystycznym wymiarze d_i, to w stanie ustalonym natężenie strugi koncentratu wypływającego ze wzbogacalnika wynosi q_{Ki} i jest funkcją następujących wielkości:

Q_i - natężenie strugi wejściowej w kg/sek,
δ - gęstość cieczy ciężkiej w kg/m^3,
δ_i - gęstość ziaren w kg/m^3,
g - przyspieszenie ziemskie w m/s^2,
η - lepkość cieczy ciężkiej w kg/s.m,
d_i - charakterystyczny wymiar ziaren w m.

Niech więc funkcja:

$$f_1(q_{Ki}, Q_i, \delta, \delta_i, g, \eta, d_i) = 0 \qquad (3.55)$$

łączy poszczególne wielkości. Z podanych zmiennych można przyjąć trzy podstawowe, które zawierają wszystkie jednostki wymiarowe kg, m, s i są od siebie wymiarowo niezależne.

Zgodnie z twierdzeniem Buckinghama [39] funkcję (3.55) można doprowadzić do postaci:

$$f_2(K_1, K_2, K_3, K_4) = 0 \qquad (3.56)$$

w której K_1, K_2, K_3, K_4 - uogólnione bezwymiarowe zmienne,

przy czym:

$$K_1 = \frac{q_i}{Q_i} \qquad (3.57)$$

$$K_2 = \frac{\delta_i}{\delta} \qquad (3.58)$$

$$K_3 = \frac{\eta d_i}{Q_i} \qquad (3.59)$$

$$K_4 = \frac{g \cdot \delta^2 d_i^5}{Q^2} \qquad (3.60)$$

Statyczne więc własności wzbogacalnika opisuje nie siedem zmiennych (3.55), lecz cztery zmienne uogólnione. Uogólnioną charakterystykę wzbogacalnika zawiesinowego można więc przedstawić np. w postaci:

$$\frac{q_{Ki}}{Q_i} = f_3\left(\frac{\delta_i}{\delta}, \frac{\eta d}{Q_i}, \frac{g \cdot \delta^2 d_i^5}{Q^2}\right) \qquad (3.61)$$

Do wstępnych badań metodą symulacji cyfrowej przyjęto uproszczoną uogólnioną charakterystykę wzbogacalnika w postaci [10]

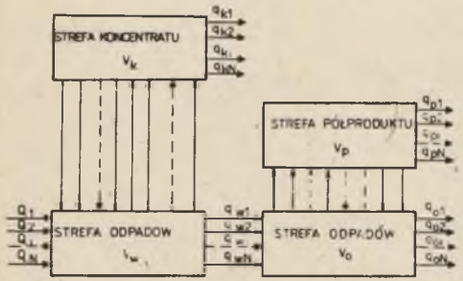
$$\frac{q_{Ki}}{Q_i} = F\left(\frac{\delta_i}{\delta}, d_i\right) \qquad (3.62)$$

Po uwzględnieniu (3.54) i (3.62) można napisać:

$$\frac{S_i}{D_o} = \frac{F\left(\frac{\delta_i}{\delta} \cdot d_i\right)}{1 - F\left(\frac{\delta_i}{\delta}, d_i\right)} \qquad (3.63)$$

3.2. Model procesu wzbogacania węgla w trójproduktowym wzbogacalniku z cieczą ciężką

Trójproduktowy wzbogacalnik z cieczą ciężką można traktować jako połączone ze sobą wzbogacalniki dwuproduktowe, przy czym odpady wzbogacalnika wstępnego kierowane są do wzbogacalnika wzbogacania wtórnego. Powstają tu więc cztery strefy: strefa koncentratu i odpadów wzbogacania wstępnego, strefa półproduktów (przerostów) i odpadów wzbogacania wtórnego.



Rys. 3.2. Uproszczony schemat blokowy procesu wzbogacania w trójproduktowym wzbogacalniku z cieczą ciężką

Na rys. 3.2 pokazano uproszczony schemat blokowy procesu wzbogacania w trójproduktowym wzbogacalniku z cieczą ciężką.

Analogicznie jak dla przypadku wzbogacalnika dwupunktowego można napisać równania różniczkowe opisujące przepływ masy przez poszczególne strefy. Mają one następującą postać:

$$\frac{dM_{wi}}{dt} = -s_i M_{wi} - D_w M_{wi} + M_{Ki} w_i + Q_i \qquad (3.64)$$

$$\frac{dM_{Ki}}{dt} = s_i M_{wi} - w_i M_{Ki} - D_K M_{Ki} \qquad (3.65)$$

$$\frac{dV_w}{dt} = -\sum_{i=1}^{I} s_i M_{wi} - D_w V_w + \sum_{i=1}^{I} M_{Ki} w_i + \sum_{i=1}^{I} Q_i \qquad (3.66)$$

$$\frac{dV_K}{dt} = \sum_{i=1}^{I} s_i M_{wi} - \sum_{i=1}^{I} w_i M_{Ki} - D_K V_K \qquad (3.67)$$

$$\frac{dM_{oi}}{dt} = - s'_i M_{oi} - D_o M_{oi} + M_{pi} w'_i + q_{wi} \qquad (3.68)$$

$$\frac{dM_p}{dt} = s_i M_{oi} - w'_i M_{pi} - D_p M_{pi} \qquad (3.69)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = - \sum_{i=1}^{I} w'_i M_{pi} - D_o V_o + \sum_{i=1}^{I} M_{pi} w'_i + \sum_{i=1}^{I} q_{wi} \qquad (3.70)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = \sum_{i=1}^{I} s'_i M_{pi} - \sum_{i=1}^{I} w'_i M_{Ki} - D_K V_K \qquad (3.71)$$

$$q_{Ki} = M_{Ki} D_K \qquad (3.72)$$

$$q_{wi} = M_{wi} D_w \qquad (3.73)$$

$$q_{pi} = M_{pi} D_p \qquad (3.74)$$

$$q_{oi} = M_{oi} D_o \qquad (3.75)$$

$$\frac{dB_{wi}}{dt} = - s_i B_{wi} - D_w B_{wi} + B_{Ki} w_i + Q_i H_i \qquad (3.76)$$

$$\frac{dB_{Ki}}{dt} = s_i B_{wi} - w_i B_{Ki} - D_K B_{Ki} \qquad (3.77)$$

$$\frac{dB_{oi}}{dt} = - s'_i B_{pi} - D_o B_{oi} + M_{pi} w'_j + q_{wi} A_{wi} \qquad (3.78)$$

$$\frac{dB_p}{dt} = s'_i B_{oi} - w'_i B_{pi} - D_p B_{pi} \qquad (3.79)$$

$$\lambda_{Ki} = \frac{B_{Ki}}{M_{Ki}} \qquad (3.80)$$

$$\lambda_{wi} = \frac{B_{wi}}{M_{wi}} \qquad (3.81)$$

$$\lambda_{pi} = \frac{B_{pi}}{M_{pi}} \qquad (3.82)$$

$$\lambda_{bi} = \frac{B_{oi}}{M_{oi}} \qquad (3.83)$$

$$q_{oK} = V_K D_K \qquad (3.84)$$

$$Q_{ow} = V_w D_w \qquad (3.85)$$

$$Q_{op} = V_p D_p \qquad (3.86)$$

$$Q_{oo} = V_o D_o \qquad (3.87)$$

$$\lambda_{oK} = \frac{\sum_{i}^{I} B_{Ki}}{V_K} \qquad (3.88)$$

$$\lambda_{ow} = \frac{\sum_{1}^{I} B_{wi}}{V_w} \qquad (3.89)$$

$$\lambda_{op} = \frac{\sum_{1}^{I} B_{pi}}{V_p} \qquad (3.90)$$

$$\lambda_{oo} = \frac{\sum_{1}^{I} B_{oi}}{V_o} \qquad (3.91)$$

gdzie:

M_{wi}, M_{Ki}, M_{oi}, M_{pi} - ilości i-tej frakcji w strefach odpowiednio w odpadach wzbogacania wstępnego, koncentracie, odpadach, półprodukcie,

D_w, D_K, D_o, D_p - natężenie wypływu strug przypadających na jednostkę ilości frakcji,

s_i, w_i, s'_i, w_i' - natężenie przepływu ziaren między strefami i-tych frakcji przypadających na jednostkę ich ilości odpowiednio dla wzbogacania wstępnego i wtórnego,

V_w, V_K, V_o, V_p - zasoby poszczególnych stref,

q_{wi}, q_{Ki}, q_{oi}, q_{pi} - natężenie strug wyjściowych i-tych frakcji z poszczególnych stref,

B_{wi}, B_{Ki}, B_{oi}, B_{pi} - ilość popiołu i-tych frakcji w poszczególnych strefach,

λ_{wi}, λ_{Ki}, λ_{oi}, λ_{pi} - zapopielenie i-tych frakcji w strudze wyjściowej z poszczególnych stref,

Q_{ow}, Q_{oK}, Q_{oo}, Q_{op} - natężenie wypływu ziaren z poszczególnych stref,

λ_{ow}, λ_{oK}, λ_{oo}, λ_{op} - zapopielenie strug wypływających z poszczególnych stref.

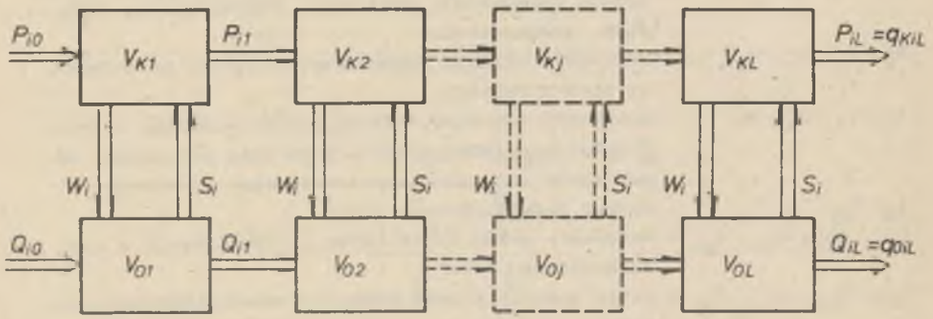
Analogicznie jak dla wzbogacalnika dwuproduktowego można podać wzory i równania dla cyfrowego modelu procesu wzbogacania w trójproduktowym wzbogacalniku. Równania te można wyprowadzić w oparciu o zależności (3.64) - (3.91).

3.3. Dynamiczny model procesu wzbogacania w osadzarce

W osadzarce pod wpływem ruchów pulsacyjnych wody następuje przemieszczenie się ziaren wzbogaconego węgla tak, że ziarna o większym ciężarze właściwym układają się pod ziarnami o mniejszym ciężarze właściwym. W ten sposób uzyskuje się rozdział nadawy na koncentrat i odpady. W zależności od sposobu rozpatrywania zjawisk zachodzących w osadzarce i od potrzeb możliwe jest opisanie procesu wzbogacania za pomocą różnych modeli matematycznych. Są to zazwyczaj modele o stałych rozłożonych.
W niniejszej pracy przyjęto różnicowy model matematyczny osadzarki.

3.3.1. Różnicowy model matematyczny procesu wzbogacania w osadzarce

W celu opisu matematycznego procesu wzbogacania w osadzarce dokonuje się myślowego podziału osadzarki wzdłuż koryta na L różnych elementów. W każdym j-tym elemencie następuje częściowe wzbogacanie węgla. Dla każdego elementu można przyjąć dwustrefowy model wzbogacania. Otrzymuje się w ten sposób schemat blokowy modelu matematycznego osadzarki dwuproduktowej (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Schemat blokowy dwuproduktowej osadzarki

Równania opisujące j-ty element koryta osadzarki mają następującą postać:

$$\frac{dM_{oij}}{dt} = -S_i M_{oij} - D_o M_{Kij} + Q_{ij-1} \tag{3.92}$$

$$\frac{dM_{Kij}}{dt} = S_i M_{oij} - w_i M_{Kij} - D_K M_{Kij} + P_{ij-1} \tag{3.93}$$

$$\frac{dV_{oj}}{dt} = -\sum_{i=1}^{I} S_i M_{oij} - D_o V_o + \sum_{i=1}^{I} M_{Kij} w_i + \sum_{i=1}^{I} Q_i \tag{3.94}$$

$$\frac{dV_{Kj}}{dt} = \sum_{i=1}^{I} S_i M_{oij} - \sum_{i=1}^{I} w_i M_{Kij} - D_K V_K + \sum_{i=1}^{I} P_{i,j-1} \tag{3.95}$$

$$\frac{dB_{oij}}{dt} = -B_{oij} S_i - D_o B_{oij} + w_i B_{Kij} + Q_{i,j-1} H_{ij-1} \tag{3.96}$$

$$\frac{dB_{Kij}}{dt} = B_{oij} S_i - w_i B_{Kij} - D_K B_{Kij} + P_{i,j-1} h_{i,j-1} \tag{3.97}$$

$$Q_{ij-1} = M_{oij-1} D_o \tag{3.98}$$

$$P_{ij-1} = M_{Kij-1} D_K \tag{3.99}$$

$$H_{ij-1} = \frac{B_{oij-1}}{M_{oij-1}} \tag{3.100}$$

$$h_{ij-1} = \frac{B_{Kij-1}}{M_{Kij-1}} \tag{3.101}$$

$$P_{i,o} = 0 \tag{3.102}$$

$$h_{io} = 0 \tag{3.103}$$

$i = 1,2,\ldots, I$
$j = 1,2,\ldots, L$

gdzie:

M_{oij} - ilość i-tej frakcji ciężarowej w j-tym elemencie strefy odpadów

M_{Kij} - ilość i-tej frakcji ciężarowej w j-tym elemencie strefy koncentratu,

V_{oj} - zasób j-tej strefy odpadów,

V_{Kj} - zasób j-tej strefy koncentratu,

S_i - szybkość przenikania ziaren i-tej frakcji ciężarowej ze strefy odpadów do strefy koncentratu przypadającej na jednostkę ilości tej frakcji w strefie,

w_i - szybkość przenikania ziaren i-tej frakcji ciężarowej ze strefy koncentratu do strefy odpadów przyjęta na jednostkę ilości tej frakcji w tej strefie,

D_o - szybkość wypływu odpadów przypadająca na jednostkę zasobu strefy odpadów,

D_K - szybkość wypływu koncentratu przypadająca na jednostkę zasobu strefy koncentratu,

P_{ij} - natężenie dopływu ziaren i-tej frakcji ciężarowej do j+1 strefy koncentratu,

Q_{ij} - natężenie dopływu ziaren i-tej frakcji ciężarowej do j+1 strefy odpadów,

B_{oij} - ilość popiołu i-tej frakcji ciężarowej w j-tej strefie odpadów,

B_{Kij} - ilość popiołu i-tej frakcji ciężarowej w j-tej strefie koncentratu,

H_{ij} - zapopielenie i-tej frakcji ciężarowej wchodzącej do j+1 strefy koncentratu.

3.3.2. Analiza stanu ustalonego procesu wzbogacania w osadzarce

W stanie ustalonym przy stałych wartościach Q_{io} równania (3.92),(3.93) przyjmują następującą postać:

$$- S_i M_{oij} - D_o M_{oij} + M_{Kij} w_i + Q_{i,j-1} = 0 \qquad (3.104)$$

$$S_i M_{oij} - w_i M_{Kij} + D_K M_{Kij} + P_{i,j-1} = 0 \qquad (3.105)$$

Zakładając, że natężenia wypływu ze strefy koncentratu i ze strefy odpadów i-tej frakcji ziarnowej z j-tego elementu są odpowiednio równe q_{Kij} q_{oij} oraz

$$q_{Kij} = D_K M_{Kij} \qquad (3.106)$$

$$q_{oij} = D_o M_{oij} \qquad (3.107)$$

to natężenie q_{Kij}, q_{oij} po uwzględnieniu (3.104) i (3.105) można wyrazić za pomocą wzorów:

$$q_{Kij} = \frac{(\frac{S_i}{D_o} + 1)P_{ij-1} + \frac{S_i}{D_o} Q_{i,j-1}}{\frac{S_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K} + 1} \qquad (3.108)$$

$$q_{oij} = \frac{Q_{i,j-1} \frac{w_i}{D_K} (1 + \frac{w_i}{D_K})P_{ij-1}}{\frac{S_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K} + 1} \qquad (3.109)$$

W stanie ustalonym zachodzi zależność

$$P_{i,j-1} + Q_{ij-1} = Q_{oi} \qquad (3.110)$$

Uwzględniając (3.110) wzory (3.108) i (3.109) przekształca się do postaci:

$$P_{i,j+1} = \frac{\frac{S_i}{D_o} Q_{io} + P_{ij}}{\frac{S_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K} + 1} \qquad (3.111)$$

$$Q_{i,j+1} = \frac{\frac{w_i}{D_K} Q_{io} + Q_{ij}}{\frac{S_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K} + 1} \qquad (3.112)$$

Równania (3.111) i (3.112) są równaniami różniczowymi.
Można je rozwiązać w oparciu o dyskretne przekształcenie Laplace'a (przekształcenie Z).

Ostateczne rozwiązanie tych równań ma postać:

$$P_{ij} = \frac{\frac{S_i}{D_o} Q_{io}}{(1 + \frac{S_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K})^j} \cdot \frac{(1 + \frac{S_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K})^j - 1}{\frac{S_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K}} \qquad (3.113)$$

$$Q_{ij} = \frac{\frac{S_i}{D_K} Q_{io}}{(1 + \frac{S_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K})^{j-1}} \cdot \frac{1 + \frac{S_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K} - 1}{\frac{S_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K}} + \frac{Q_{io}}{(1 + \frac{S_i}{D_o} + \frac{w_i}{D_K})^j} \qquad (3.114)$$

Przyjmując, że prędkości w_i są równe zeru, wzory (3.113),(3.114) przekształca się do postaci:

$$\frac{P_{ij}}{Q_{io}} = \frac{(1 + \frac{S_i}{D_o})^j - 1}{(1 + \frac{S_i}{D_o})^j} \tag{3.115}$$

$$\frac{Q_{ij}}{Q_{io}} = \frac{1}{(\frac{S_i}{D_o} + 1)^j} \tag{3.116}$$

a stąd dla $j = L$ otrzymuje się:

$$\frac{S_i}{D_o} = \sqrt[L]{\frac{1}{1 - \frac{P_{iL}}{Q_{iL}}}} \tag{3.117}$$

Korzystając z uogólnionych charakterystyk procesu wzbogacania w osadzarce [10,12] można wyznaczyć w oparciu o wzór (3.117) stosunek $\frac{S_i}{D_o}$ dla przyjętego ciężaru właściwego rozdziału.

3.3.3. Model procesu wzbogacania w trójproduktowej osadzarce

Trójproduktową osadzarkę można traktować jako połączone ze sobą osadzarki dwuproduktowe, przy czym frakcja pływająca wzbogacalnika wzbogacania wstępnego kierowana jest do wzbogacania wtórnego. Dokonując podziału obydwu osadzarek wzdłuż koryta na L elementów i w każdym elemencie wydzielając strefę koncentratu i odpadów, można opisać proces wzbogacania w trójproduktowej osadzarce za pomocą dwóch różniczkowych modeli.

Ze względu na ograniczoną objętość pracy podane zostaną równania różniczkowe w postaci końcowej:

$$\frac{dM_{oij}}{dt} = - S'_i M_{oij} - D'_o M_{wij} + Q_{ij-1} \tag{3.118}$$

$$\frac{dM_{wij}}{dt} = S'_i M_{oij} - w'_i M_{wij} - D'_w M_{wij} + P_{ij-1} \tag{3.119}$$

$$\frac{dV_{oj}}{dt} = - \sum_{i=1}^{I} S'_i M_{oij} - D_o V_o + \sum_{i=1}^{I} M_{wij} w'_i + \sum_{i=1}^{I} Q_i \tag{3.120}$$

$$\frac{dV_w}{dt} = \sum_{i=1}^{I} S'_i M_{oij} - \sum_{1}^{I} w'_i M_{Kij} - D_w V_{wj} \sum_{i=1}^{I} P_{ij-1} \tag{3.121}$$

$$\frac{dB_{oij}}{dt} = - B_{oij} S'_i - D_o B_{oij} + w'_i B_{wij} + Q_{i,j-1} H'_{ij-1} \tag{3.122}$$

$$\frac{dB_{wij}}{dt} = B_{oij} S'_i - w_i B_{wij} - D'_w B_{wij} + P_{i,j-1} h'_{ij-1} \tag{3.123}$$

$$Q_{ij-1} = M_{oij-1} D'_o \tag{3.124}$$

$$P_{ij-1} = M_{wij-1} D'_K \tag{3.125}$$

$$H'_{ij-1} = \frac{B_{oij-1}}{M_{oij-1}} \tag{3.126}$$

$$h'_{ij-1} = \frac{B_{wij-1}}{M_{wij-1}} \tag{3.127}$$

$$P_{io} = 0 \tag{3.128}$$

$$h_{io} = 0 \tag{3.129}$$

$$\frac{dM_{PiL}}{dt} = S''_o M_{PiL} - D_o M_{KiL} + R_{ij-1} \tag{3.130}$$

$$\frac{dM_{KiL}}{dt} = S''_i M_{PiL} - w''_i M_{KiL} - D_K M_{KiL} + Q_{iL-1} \tag{3.131}$$

$$\frac{dV_{PL}}{dt} = - \sum_{i=1}^{I} S''_i M_{PiL} - D_p V_{PL} + \sum_{i=1}^{I} M_{KiL} w''_i + \sum_{i=1}^{I} R_{iL-1} \tag{3.132}$$

$$\frac{dV_{KL}}{dt} = \sum_{i=1}^{I} S''_i M_{PiL} - \sum_{i=1}^{I} w''_i M_{KiL} - D_K V_{KL} + \sum_{i=1}^{I} O_{iL-1} \tag{3.133}$$

$$\frac{dB_{PiL}}{dt} = - B_{oiL} S''_i - D_p B_{PiL} + w''_i B_{KiL} + R_{iL-1} H''_{iL-1} \tag{3.134}$$

$$\frac{dB_{KiL}}{dt} = B_{oiL} S''_i - w''_i B_{KiL} - D_K B_{KiL} + O_{i,L-1} h''_{iL-1} \tag{3.135}$$

$$R_{iL-1} = M_{PiL-1}\, D_p \tag{3.136}$$

$$O_{iL-1} = M_{KiL-1}\, D_K \tag{3.137}$$

$$H''_{iL-1} = \frac{B_{PiL-1}}{M_{PiL-1}} \tag{3.138}$$

$$h''_{i,L-1} = \frac{B_{Ki,L-1}}{M_{Ki,L-1}} \tag{3.139}$$

$$O_{iL-1} = 0 \tag{3.140}$$

$$h''_{iL-1} = 0 \tag{3.141}$$

$$R_{io} = P_{iL} \tag{3.142}$$

$$H''_{io} = H_{iL} \tag{3.143}$$

$i = 1,2,\ldots, I \qquad j = 1,2,\ldots,L$

$$Q_{CK} = V_K\, D_K \tag{3.144}$$

$$Q_{CP} = V_p\, D_p \tag{3.145}$$

$$Q_{Co} = V_o\, D_o \tag{3.146}$$

$$\lambda_{CK} = \frac{\sum_{i}^{I} B_{Ki}}{V_K} \tag{3.147}$$

$$\lambda_{CP} = \frac{\sum_{i}^{I} B_{Pi}}{V_P} \tag{3.148}$$

$$\lambda_{Co} = \frac{\sum_{i}^{I} B_{oi}}{V_o} \tag{3.149}$$

gdzie:

M_{wij}, M_{Kij}, M_{oij}, M_{Pij} - ilość i-tej frakcji w j-tym elemencie w strefach, odpowiednio: w koncentracie wzbogacania wstępnego, wtórnego, odpadach, półprodukcie,

B_{wij}, B_{Kij}, B_{oij}, B_{Pij} - ilość popiołu w i-tej frakcji w j-tym elemencie w strefach, odpowiednio: w koncentracie wzbogacania wstępnego, wtórnego, odpadach wzbogacania wstępnego i wtórnego,

V_w, V_K, V_o, V_p - zasoby stref, odpowiednio: koncentratu wzbogacania wstępnego i wtórnego, odpadów wzbogacania wstępnego i wtórnego,

D_w, D_K, D_o, D_p - natężenie wypływu strug przypadających na jednostkę ilości frakcji w poszczególnych strefach,

S'_i, w'_i, S''_i, w''_i - natężenie przepływu ziaren i-tych frakcji między strefami przypadających na jednostkę tych ilości, odpowiednio dla wzbogacania wstępnego i wtórnego,

Q_{ij}, P_{ij} - natężenie dopływu ziaren i-tej frakcji ciężarowej do j-tej strefy, odpowiednio: odpadów, koncentratu wzbogacania wstępnego,

R_{iL}, O_{iL} - natężenie dopływu ziaren i-tej frakcji ciężarowej do L-tej strefy, odpowiednio: odpadów, koncentratu,

H'_{ij}, h'_j - zapopielenie i-tej frakcji ciężarowej wchodzącej do j-tej strefy, odpowiednio: odpadów, koncentratu wzbogacania wstępnego,

H''_{iL}, h''_{iL} - zapopielenie i-tej frakcji ciężarowej wchodzącej do j-tej strefy, odpowiednio: odpadów, koncentratu wzbogacania wtórnego,

Q_{CK}, Q_{CP}, Q_{Co} - natężenie wypływu ziaren z poszczególnych stref,

λ_{CK}, λ_{CP}, λ_{Co} - zapopielenie ziaren wypływających w poszczególnych stref.

3.4. Matematyczny model nadawy

3.4.1. W ł a s n o ś c i n a d a w y

Własności nadawy w danej klasie ziarnowej można przedstawić za pomocą jej składu densymetryczneg i zapopielenia poszczególnych frakcji ciężarowych. Nadawa jest więc charakteryzowana przez wektów wychodów $\bar{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_I)$ oraz ich zapopielenie $\bar{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_I)$. Przebiegi $\gamma_i(t)$ oraz $\lambda_i(t)$ w określonym przedziale czasu mają charakter procesu stochastycznego o funkcji autokorelacji typu wykładniczego:

$$R_{\lambda i}(\tau) = R_{\lambda i}(0)\, e^{-\alpha_{\lambda i}(\tau)} \tag{3.150}$$

$$R_{\lambda i}(\tau) = R_{\lambda i}(0)\, e^{-\alpha_{\lambda i}(\tau)} \qquad (3.151)$$

gdzie:

$\alpha_{\lambda i}$, $\alpha_{\gamma i}$ - odpowiednio współczynniki tłumienia funkcji autokorelacji dla zapopielenia i wychodu i-tej frakcji ciężarowej,

$R_{\lambda i}(0)$, $R_{\gamma i}(0)$ - wariancja przebiegu odpowiednio zapopielenia i wychodu i-tej frakcji ciężarowej.

Przyjęcie takich przebiegów zostało oparte na pracach [31, 35].

3.4.2. Natężenie strugi nadawy

Przyjęto również, że strumień nadawy $X_N(t)$ przychodzący na wzbogacalnik ma charakter przebiegu stochastycznego o rozkładzie normalnym, wartości średniej $\bar{X}_N$ i funkcji autokorelacji typu wykładniczego:

$$R_N(\tau) = R_N(0)\, e^{-\alpha_N(\tau)} \qquad (3.152)$$

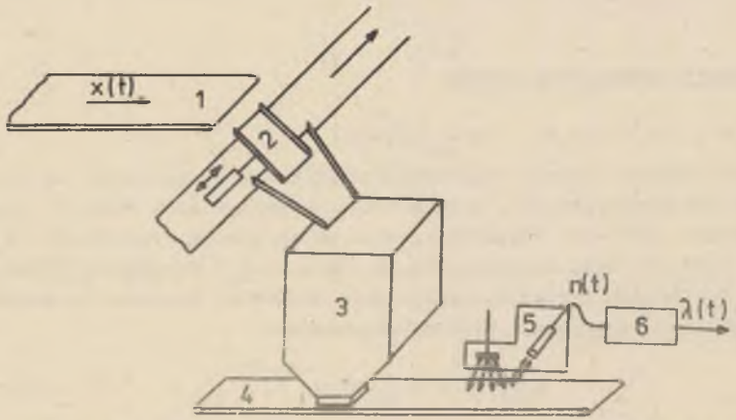
gdzie:

$R_N(0)$ - wariancja przebiegu natężenia strugi nadawy,

α_N - współczynnik tłumienia funkcji autokorelacji natężenia strugi nadawy.

3.5. Matematyczny model radiometrycznego czujnika zapopielenia produktów wzbogacania

Do automatycznego pomiaru zapopielenia λ mogą znaleźć zastosowanie czujniki radiometryczne [9, 11]. Na rys. 3.4 przedstawiono zasadę działania

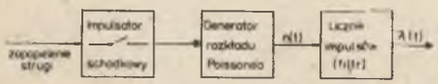


Rys. 3.4. Zasada działania czujnika zapopielenia węgla

czujnika zapopielenia produktów wzbogacania. Zasada pracy czujnika jest następująca. Z przenośnika taśmowego pobierana jest próba za pomocą próbobiornika 2 umieszczonego okresowo w strudze węgla x. Pobrana próbka przesyłana jest do zbiornika 3, następnie poprzez układ przygotowania oraz układ dozujący próbka podawana jest przenośnikiem pomiarowym 4 do urządzenia radiometrycznego 5. W skład urządzenia 5 wchodzą: źródło promieniowania i detektor (licznik scyntylacyjny). Impulsy n(t) z detektora przekazywane są do przetwornika sygnału pomiarowego 6.

Model matematyczny tworzy się przyjmując następujące założenia [11]:

- w zbiorniku 3 nie następuje zmieszanie próbek i nie odbywa się klasyfikacja,
- zapopielenie $\lambda(t)$ jest jednakowe w całym przekroju poprzecznym strugi $x(t)$,
- sygnał pomiarowy n(t) w przedziale czasu t, t + Δt podlega rozkładowi Poissona,
- czas pobierania próbki (czas, w którym próbobiornik będzie znajdował się w strudze węgla) jest krótki (pobieranie impulsowe),
- dla uzyskania ciągłości wskazań wielkość każdorazowej próbki jest tak dobrana, że w czasie jednego cyklu zbiornik zostaje całkowicie opróżniony,
- wartość oczekiwania liczby impulsów pomiarowych E(n) jest liniową funkcją zapopielenia.



Rys. 3.5. Schemat blokowy czujnika zapopielenia

Na rys. 3.5 przedstawiono schemat blokowy czujnika zapopielenia z trzech szeregowo połączonych bloków:

- impulsatora schodkowego reprezentującego próbobiornik wraz ze zbiornikiem,
- generatora liczb losowych,
- filtra spełniającego rolę uśredniacza.

Zasadniczym elementem modelu matematycznego czujnika zapopielenia jest generator liczb losowych. Zasada jego budowy omówiona zostanie dalej.

Zakładając liniową zależność wartości oczekiwanej liczby impulsów w jednostce czasu funkcji zapopielenia można napisać:

$$E(n) = a_o + a_1\lambda \qquad (3.153)$$

gdzie:

a_o, a_1 - współczynniki zależności liniowej.

Zgodnie z przyjętym założeniem o rozkładzie sygnału pomiarowego w postaci rozkładu Poissona, odchylenie statyczne ilości zliczanych impulsów w jednostce czasu wynosi:

$$\sigma_{imp} = \sqrt{E(n)} = \sqrt{a_o + a_1\lambda} \qquad (3.154)$$

co w przeliczeniu na zawartość popiołu daje:

$$\sigma_\lambda = \frac{1}{a_1}\sqrt{a_o + a_1\lambda} = \sqrt{\frac{a_o}{a_1^2} + \frac{\lambda}{a_1}} \qquad (3.155)$$

Jeśli czas pomiaru wynosi T_p, to liczba zliczanych impulsów jest równa:

$$E'(n) = T_o(a_o + a_1\lambda) \qquad (3.156)$$

i wtedy odchylenie standardowe zawartości popiołu wynosi:

$$\sigma'_\lambda = \sqrt{\frac{a_o}{a_1^2\, T_p} + \frac{\lambda}{a_1\, T_p}} \qquad (3.157)$$

Można również przyjąć, że pomiar zapopielenia obarczony jest dodatkowo błędem niezależnym od czasu o odchyleniu σ_S.
Odchylenie wypadkowe pomiaru zapopielenia $\sigma_{w\lambda}$ jest więc równe:

$$\sigma_{\lambda w} = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_\lambda^2} \qquad (3.158)$$

Dla celów symulacji przyjęto dane otrzymane w wyniku badań popiołomierza gamma G-3.

Przekształcenie równania (3.157) daje:

$$T_p = \frac{a_o}{a_1^2\,\sigma_\lambda^2} + \frac{\lambda}{a_1\,\sigma_\lambda^2} \qquad (3.159)$$

Modelem popiołomierza jest więc generator liczb losowych o rozkładzie normalnym i odchyleniu wyznaczonym z zależności (3.158).

3.6. Matematyczny model wskazań czujników natężenia przepływu (wag taśmowych)

Założono, że wskazania czujników (wag taśmowych) natężenia przepływu produktów x_w obarczone są błędem przypadkowym u_w o rozkładzie normalnym $(0, \sigma_w)$:

$$x_w = x + u_w \qquad (3.160)$$

gdzie:

x - rzeczywista wartość natężenia przepływu produktu,

σ_w - wariancja uchybu wskazań czujnika.

3.7. Uwagi dotyczące dynamicznych modeli wzbogacalników cieczy ciężkiej osadzarek, nadawy oraz modeli czujników pomiarowych

Modele matematyczne elementów sterowania opracowane zostały z punktu widzenia zastosowania ich do badania algorytmu identyfikacji procesów wzbogacania metodą symulacji. W modelach wzbogacalników chodziło przede wszystkim o uwzględnienie własności dynamicznych procesu wzbogacania. Uzyskano to poprzez wydzielenie stref koncentratu i odpadów, co pozwoliło na opisanie procesu wzbogacania układem równań różniczkowych. Można również budować modele trójstrefowe [3], jednak opisywane są one przez bardziej rozbudowane układy równań różniczkowych, co znacznie wydłuża czas wykonywanych obliczeń i w przypadku symulacji nie jest wskazane.

Modele procesów wzbogacania spełniają również własności statyczne, kiedy jego parametry są prawidłowo dobrane. Ważnym zagadnieniem jest więc dobór parametrów modelu. Parametry statyczne zostały dobrane w oparciu o wyniki uogólnionych charakterystyk wzbogacalników, pozostałe przyjęto na podstawie wstępnych badań wzbogacalników zakładu wzbogacania KWK Knurów.

4. IDENTYFIKACJA PROCESU WZBOGACANIA WĘGLA WE WZBOGACALNIKU Z CIECZĄ CIĘŻKA I W OSADZARCE

4.1. Podstawy teoretyczne

4.1.1. Z a ł o ż e n i a

Przez identyfikację charakterystyki statycznej wzbogacalnika będzie się rozumiało wyznaczenie, w oparciu o możliwe do przeprowadzenia pomiary podstawowych parametrów wzbogacania, współczynników regresji przyjętych empirycznych matematycznych modeli.

Zakłada się, że można wykonać następujące pomiary:

- natężenia strugi dopływu nadawy x_N,
- natężenia strugi wypływu produktów wzbogacania x_k, x_p, x_o,
- gęstości cieczy we wzbogacalniku zawiesinowym δ_1, δ_2,
- zapopielenia produktów wzbogacania λ_k, λ_p.

Wzbogacalnik cieczy ciężkiej opisują dwie charakterystyki:

- wychód koncentratu γ_k w zależności od gęstości δ_1 cieczy ciężkiej

$$\gamma_k = \gamma_k(\delta_1) \tag{4.1}$$

oraz zapopielenie koncentratu λ_k w zależności od gęstości cieczy ciężkiej:

$$\lambda_k = \lambda_k(\delta_1) \tag{4.2}$$

natomiast osadzarka zostanie opisana charakterystyką podającą zależność wychodu koncentratu od jego zapopielenia:

$$\gamma_k = \gamma_k(\lambda_k) \tag{4.3}$$

Dla wyznaczenia charakterystyk (4.1), (4.2) w postaci analitycznej (tablica 2.1) trzeba wyznaczyć wychód koncentratu dla co najmniej dwóch wartości gęstości cieczy ciężkiej δ_{11}, δ_{12}.

We wzbogacalniku trójproduktowym potrzebne pomiary w punktach δ_{11}, δ_{12} można uzyskać drogą pośrednią, przyjmując:

$$\delta_{11} = \delta_1 \tag{4.4}$$

$$\delta_{12} = \delta_2 \tag{4.5}$$

gdzie:

δ_1, δ_2 - gęstości cieczy ciężkiej wzbogacania wstępnego i wtórnego

oraz poprzez pomiar:

- natężenia dopływu nadawy x_N,
- natężenia wypływu koncentratu x_k,
- natężenia wypływu półproduktu x_p,

lub

- natężenia wypływu koncentratu x_k,
- natężenia wypływu półproduktu x_p,
- natężenia wypływu odpadów x_o.

Dla pierwszego przypadku wychód koncentratu przy gęstości cieczy ciężkiej δ_1 wzbogacania wstępnego jest równy:

$$\gamma_k(\delta_1) = \frac{x_k}{x_N} \tag{4.6}$$

a dla gęstości równej gęstości cieczy ciężkiej δ_2 można z dużym przybliżeniem wyrazić za pomocą wzoru:

$$\gamma_k(\delta_2) = \frac{x_k + x_p}{x_N} \tag{4.7}$$

Dla drugiego przypadku wzory na wychód koncentratu przy gęstościach δ_1 i δ_2 mają następującą postać:

$$\gamma_k(\delta_1) = \frac{x_k}{x_k + x_p + x_o} \tag{4.8}$$

$$\gamma(\delta_2) = \frac{x_k + x_p}{x_k + x_p + x_o} \tag{4.9}$$

Zapopielenia koncentratu natomiast w obu przypadkach są równe:

$$\lambda_k(\delta_1) = \lambda_k \tag{4.10}$$

$$\lambda_k(\delta_2) = \frac{\lambda_k \gamma_k(\delta_1) + \lambda_p \gamma_p(\delta_2)}{\gamma_k(\delta_1) + \gamma_k(\delta_2)} \tag{4.11}$$

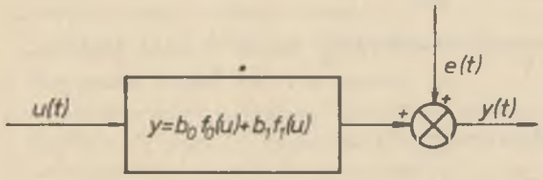
Dokładność wyznaczania wychodów będzie zależała od dokładności pomiarów natężenia strug nadawy i produktów wzbogacania (czujników pomiarowych) oraz od wielkości zakłócenia tych strug spowodowanego dynamicznymi własnościami wzbogacalnika. Określenie dokładności wyznaczania współczynników regresji jest zagadnieniem bardzo złożonym i w pracy tej dokładność identyfikacji bada się metodami symulacyjnymi.

Zasadniczą sprawą wyboru opracowania algorytmu identyfikacji procesu wzbogacania jest konieczność uzyskania możliwie dokładnych wyników identyfikacji przy niezbyt długich czasach trwania pomiarów bez konieczności wprowadzania celowych zmian nastaw maszyn (zmiennych sterujących), a więc w warunkach eksperymentu biernego (w warunkach normalnej eksploatacji obiektu). Istnieje wiele metod identyfikacji. Do najważniejszych z nich należy metoda najmniejszych kwadratów i metoda aproksymacji stochastycznej.

W pracy tej została przeanalizowana metoda najmniejszych kwadratów.

4.1.2. Wyznaczanie współczynników regresji metodą najmniejszych kwadratów

W punkcie tym przeprowadzona zostanie analiza algorytmu identyfikacji charakterystyki statycznej obiektu sterowania metodą najmniejszych kwadratów. Sygnał wyjściowy (rys. 4.1) jako zmienna zależna jest obarczony addytywnym zakłóceniem e(t) o wartości oczekiwanej równej zeru i funkcji autokorelacji typu wykładniczego:



Rys. 4.1. Schemat blokowy uproszczonego modelu obiektu identyfikacji

$$R_e(\tau) = R_e(0)e^{-\alpha_e(\tau)} \qquad (4.12)$$

Na wejściu obiektu doprowadzony jest sygnał sterujący u(t). Tak przyjęty model obiektu sterowania nie odpowiada obiektowi, jakim jest wzbogacalnik. Przyjęcie takich założeń upraszczających pozwala na przeprowadzenie analizy teoretycznej dokładności identyfikacji metodą najmniejszych kwadratów.

Równanie regresji rozpatrywanego zagadnienia ogólnie można przedstawić w postaci:

$$y = b_0 f_0(u) + b_1 f_1(u) \qquad (4.13)$$

gdzie:

- y - zmienna wyjściowa,
- b_0, b_1 - współczynniki regresji,
- $f_0(u)$, $f_1(u)$ - zadane z góry funkcje argumentu u.

Identyfikację przeprowadza się w oparciu o wyniki N pomiarów zmiennej y przy różnych wartościach argumentu u, przy czym $N > 2$. Wyniki pomiarów można zapisać za pomocą tzw. tablicy obserwacji:

$$\begin{bmatrix} f_0(u_1), & f_1(u_1), & y_1 \\ f_0(u_2), & f_1(u_2), & y_2 \\ \hline f_0(u_N), & f_1(u_N), & y_N \end{bmatrix} \qquad (4.14)$$

Współczynniki regresji wyznacza się zgodnie z [36] wg wzorów:

$$b_0 = \frac{\begin{vmatrix} \sum_1^N f_0(u_i)y_i, & \sum_1^N f_0(u_i)\,f_1(u_i) \\ \sum_1^N f_1(u_i)y_i, & \sum_1^N f_1^2(u_i) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_1^N f_0(u_i), & \sum_1^N f_0(u_i)\,f_1(u_i) \\ \sum_1^N f_0(u_i)f_1(u_i), & \sum_1^N f_1^2(u_i) \end{vmatrix}} \qquad (4.15)$$

$$b_1 = \frac{\begin{vmatrix} \sum_1^N f_0^2(u_i), & \sum_1^N f_0(u_i)\,y_1 \\ \sum_1^N f_0(u_i)f_1(u_i), & \sum_1^N f_1^2(u_i) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_1^N f_0^2(u_i), & \sum_1^N f_0(u_i)f_1(u_i) \\ \sum_1^N f_0(u_i)f_1(u_i), & \sum_1^N f_1^2(u_i) \end{vmatrix}} \qquad (4.16)$$

4.1.3. Dokładność wyznaczania współczynników regresji

Wyniki pomiarów obarczone są błędami wynikającymi ze stochastycznego charakteru zakłóceń własności nadawy, zakłóceniami działającymi na wzbogacalnik i błędami pomiarowymi czujników. Obliczone więc za pomocą wzorów

(4.15) i (4.16) współczynniki regresji będą obarczone błędem. Jako miarę błędu przyjęto wariancję współczynników regresji.

Niech b_o i b_1 będą obliczonymi współczynnikami regresji dla układu, kiedy nie występują zakłócenia:

$$e(t) = 0 \tag{4.17}$$

Wzory na uchyby współczynników regresji powstałych na skutek istnienia zakłóceń $e(t)$ są równe:

$$b_o - \bar{b}_o = \frac{\begin{vmatrix} \sum_1^N f_o^2(u_i)e_i, & \sum_1^N f_1(u_i)\, f_o(u_i) \\ \sum_1^N f_1(u_i)e_i, & \sum_1^N f_1^2(u_i) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_1^N f_o^2(u_i), & \sum_1^N f_o(u_i)\, f_1(u_i) \\ \sum_1^N f_o(u_i)f_1(u_i), & \sum_1^N f_1^2(u_i) \end{vmatrix}} \tag{4.18}$$

$$b_1 - \bar{b}_1 = \frac{\begin{vmatrix} \sum_1^N f_o^2(u_i), & \sum_1^N f_o(u_i)\, e_i \\ \sum_1^N f_o(u_i)f_1(u_i), & \sum_1^N f_1(u_i)\, e_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_1^N f_o^2(u_i), & \sum_1^N f_o(u_i)f_1(u_i) \\ \sum_1^N f_o(u_i)f_1(u_i), & \sum_1^N f_1^2(u_i) \end{vmatrix}} \tag{4.19}$$

Po dokonaniu przekształceń zgodnie z [36] otrzymuje się ostateczne wyrażenia na wariancję współczynników regresji:

$$\operatorname{var} b_o = \frac{\sum_1^N f_1(u_i)}{\begin{vmatrix} \sum_1^N f_o^2(u_i), & \sum_1^N f_o(u_i)f_1(u_i) \\ \sum_1^N f_o(u_i)f_1(u_i), & \sum_1^N f_1^2(u_i) \end{vmatrix}}\, \sigma_e^2 \tag{4.20}$$

$$\operatorname{var} b_1 = \frac{\sum_1^N f_o(u_i)}{\begin{vmatrix} \sum_1^N f_o^2(u_i), & \sum_1^N f_o(u_i)f_1(u_i) \\ \sum_1^N f_o(u_i)f_1(u_i), & \sum_1^N f_1^2(u_i) \end{vmatrix}}\, \sigma_e^2 \tag{4.21}$$

Wariancje współczynników regresji są więc proporcjonalne do zakłócenia σ_e^2, natomiast współczynnik proporcjonalności jest zależny od wyboru funkcji regresji $f_o(u)$ i $f_1(u)$.
Zakładając, że wyznaczenie współczynników regresji dokonuje się w oparciu o N pomiarów zmiennej y przy dwóch stałych wartościach zmiennej u ($u_1 = \delta_1$, $u_i = \delta_2$), analityczną postać wzorów (4.20) i (4.21) dla wybranych w rozdziale 3 funkcji regresji przedstawiono w tablicy 3.1.

4.1.4. Identyfikacja a problemy pomiarowe

Jak już było powiedziane, źródłem błędów identyfikacji są między innymi uchyby wnoszone przez układy pomiarowe zarówno przy pomiarze natężenia strug jak i zapopielenia produktów wzbogacania. Błędy wnoszone przez układ pomiarowy są dwojakiego rodzaju:

- związane z uchybem wnoszonym przez sam czujnik,
- związane z niemożliwością odtworzenia przebiegu zmiennej pomiarowej funkcji czasu, a spowodowane pomiarem nieciągłym.

Przy pomiarze, np. zapopielenia strugi węgla, błąd wnoszony przez czujnik jest zależy [11] od czasu pomiaru próbki. Im czas ten jest większy, tym dokładniejszy jest pomiar. Natomiast przy impulsowym pobieraniu próbki odtworzenie przebiegu funkcji czasu jest mniej dokładne.

Przyjęto następujące oznaczenia:

T - czas trwania identyfikacji,

T_p - czas pomiaru zapopielenia węgla.

Ilość pomiarów N, jakie wykonuje się podczas trwania identyfikacji, wynosi:

$$N = \frac{T}{T_p} \tag{4.22}$$

W przypadku stosowania impulsowego pomiaru natężenia strugi węgla określane są chwilowe wartości (iT_p) w momentach czasu $iT_p (i = 0,1,2,3,\ldots\ldots,N-1)$.

Rozważając problemy identyfikacji charakterystyk statycznych wzbogacalnika (4.1) i (4.2) poczyniono następujące dodatkowe założenia:

- przebiegi czasowe wychodów $\gamma(t)$ i zapopielenia $\lambda(t)$ są przebiegami spełniającymi warunki ergotyczności i stacjonarności,
- odchylenie standardowe σ_p wnoszonego uchybu przez popiołomierz jest równe:

$$\sigma_p^2 = \frac{const}{T_p} \tag{4.23}$$

- uchyb czujnika natężenia strugi urobku jest niezależny od czasu pomiaru o odchyleniu standardowym σ_w.

W celu dalszej analizy założono, że identyfikacja przebiega przy dwóch stałych wartościach $u(\delta_1, \delta_2)$. Wzory (4.18) i (4.19) można więc napisać w postaci:

$$b_o - \bar{b}_o = \frac{\begin{vmatrix} f_o^2(\delta_1) + f_o^2(\delta_2) \sum_1^N e_i, & f_1(\delta_1)f_o(\delta_1) + f_1(\delta_2)f_o(\delta_2) \\ f_1(\delta_1) + f_1(\delta_2) \sum_1^N e_i, & f_1(\delta_1) + f_1(\delta_2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} f_o^2(\delta_1) + f_o^2(\delta_2), & f_o(\delta_1)f_1(\delta_2) + f_o(\delta_2)f_1(\delta_2) \\ f_o(\delta_1)f_1(\delta_1) + f_o(\delta_2)f_1(\delta_2), & f_1^2(\delta_1) + f_1^2(\delta_2) \end{vmatrix}} \cdot \frac{1}{N} \tag{4.24}$$

$$b_1 - \bar{b}_1 = \frac{\begin{vmatrix} f_o^2(\delta_1) + f_o^2(\delta_2), & f_o(\delta_1) + f_o(\delta_2) \sum_1^N e_i \\ f_o(\delta_1)f_1(\delta_1) + f_o(\delta_2)f_1(\delta_2) + f_1(\delta_2) \sum_1^N e_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} f_o^2(\delta_1) + f_o^2(\delta_2), & f_o(\delta_1)f_1(\delta_2) + f_o(\delta_2)f_1(\delta_2) \\ f_o(\delta_1)f_1(\delta_1) + f_o(\delta_2)f_1(\delta_2), & f_1^2(\delta_1) + f_1^2(\delta_2) \end{vmatrix}} \cdot \frac{1}{N} \tag{4.25}$$

Zatem zgodnie z (4.20) i (4.21) otrzymuje się:

$$\operatorname{var} b_o = A_o \frac{1}{N^2} \operatorname{var} \sum_o^{N-1} e_i \tag{4.26}$$

$$\operatorname{var} b_1 = A_1 \frac{1}{N^2} \operatorname{var} \sum_o^{N-1} e_i \tag{4.27}$$

gdzie:

A_o, A_1 - stała zależna od wyboru δ_1, δ_2.

Zależności (4.26) i (4.27) będą stanowiły podstawę do wyznaczania wariancji współczynników regresji przy różnych sposobach pomiarów przebiegów identyfikowanych zależności. Należy bowiem wyznaczyć dla każdego sposobu pomiaru:

$$\operatorname{var} \sum_1^N e_i \tag{4.28}$$

Błąd e_i jest sumą zakłócenia przebiegu e_{pi} i uchybu przypadkowego układu pomiarowego e_{ui}:

$$e_i = e_{pi} + e_{ui} \tag{4.29}$$

Wariancję (4.28) można wyznaczyć w następujący sposób:

$$\operatorname{var} \sum_1^N e_i = \operatorname{var} \sum_1^N e_{pi} + \sum_1^N e_{ui} = \operatorname{var} \sum_1^N e_{pi} + \operatorname{var} \sum_1^N e_{ui} \tag{4.30}$$

stąd otrzymujemy:

$$\operatorname{var} \sum_1^N e_i = \operatorname{var} \sum_1^N e_{pi} + N\sigma_u^2 \tag{4.31}$$

gdzie:

σ_u^2 - wariancja błędu układu pomiarowego.

Zależność (4.30) jest słuszna, gdy uchyby są statystycznie niezależne.

4.1.5. Identyfikacja charakterystyki statycznej przy pomiarach ciągłych

Przy pomiarach ciągłych następuje ciągły pomiar przebiegu w czasie T_p, a następnie wyznacza się jego wartość średnią.

Zatem:

$$e_{pi} = \frac{1}{T_p} \int_{T_p i}^{T_p(i+1)} e_p(t)dt \qquad (i = 0,1,2,\ldots,N-1) \qquad (4.32)$$

Składnik wyrażenia (4.31) związany z zakłóceniem przebiegu można po uwzględnieniu (4.32) doprowadzić do postaci:

$$\operatorname{var} \sum_{1}^{N} e_{pi} = \operatorname{var} \sum_{o}^{N-1} \frac{1}{T_p} \int_{T_p(i-1)}^{T_p i} e_p(t)dt =$$

$$= \left(\frac{T}{T_p}\right)^2 \operatorname{var} \frac{1}{T} \int_{o}^{T} e_p(t)dt \qquad (4.33)$$

Ostatecznie, po uwzględnieniu (4.20), (4.31), (4.33) przy pomiarach ciągłych otrzymuje się wyrażenie:

$$\frac{1}{N^2} \operatorname{var} \sum_{1}^{N} e_i = \operatorname{var} \frac{1}{T} \int_{o}^{T} e_p(t)dt + \frac{\sigma_u^2}{N} \qquad (4.34)$$

Jeśli przebieg $e_p(t)$ jest przebiegiem stacjonarnym, to zgodnie z [44]:

$$\operatorname{var} \frac{1}{T} \int_{o}^{T} e_p(t)dt = \frac{2}{T} \int_{o}^{T} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_{e_p}(\tau)d\tau \qquad (4.35)$$

Jeśli $e_p(t)$ ma funkcję autokorelacji typu (4.12), to:

$$\operatorname{var} \frac{1}{T} \int_{o}^{T} e_p(t)dt = \left[\frac{2}{\alpha_p T} + \frac{2}{T^2 \alpha_p^2}\left(e^{-\alpha_p T} - 1\right)\right] R_{e_p}(0) \qquad (4.36)$$

Po uwzględnieniu (4.26), (4.27), (4.35), (4.36) warianoja współczynników regresji wynosi:

$$\operatorname{var} b_o = A_o \left\{ \left[\frac{2}{\alpha_p T} + \frac{2}{T^2 \alpha_p^2}\left(e^{-\alpha_p T} - 1\right)\right] R_{e_p}(0) + \frac{\sigma_u^2}{N} \right\} \qquad (4.37)$$

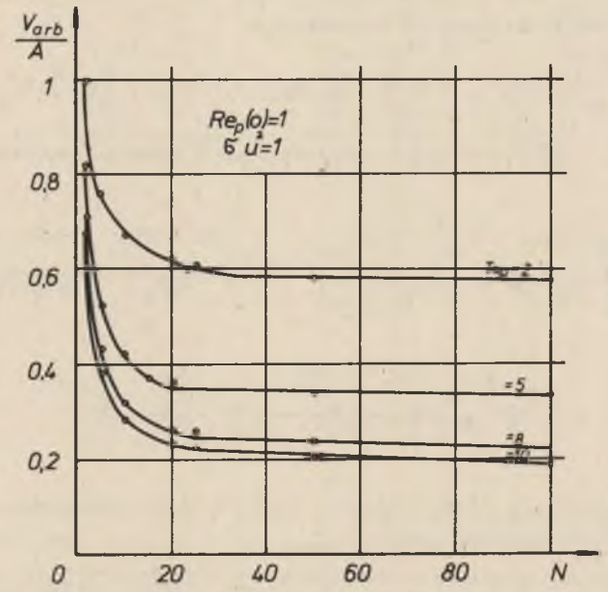
$$\operatorname{var} b_1 = A_1 \left\{ \left[\frac{2}{\alpha_p T} + \frac{2}{T^2 \alpha_p^2}\left(e^{-\alpha_p T} - 1\right)\right] R_{e_p}(0) + \frac{\sigma_u^2}{N} \right\} \qquad (4.38)$$

Jak widać z przedstawionych wyników (4.37) i (4,38), warianoje współczynników regresji zależą od wielkości zakłócenia przebiegu $R_{e_p}(0)$ i od dokładności układu pomiarowego σ_u^2.

Dla dostatecznie dużej liczby pomiarów N lub przy dokładnej pracy układu pomiarowego ($\sigma_u = 0$) mamy:

$$\frac{\sigma_u^2}{N} = 0 \qquad (4.39)$$

i wtedy warianoje współczynników regresji są tylko zależne od czasu pomiaru T, przy czym im większy czas pomiaru, tym warianoja współczynników regresji jest mniejsza. Na rys. 4.2 pokazano rodzinę krzywych warianoji współczynników regresji funkcji liczby pomiarów.



Rys. 4.2. Zależność warianoji współczynników regresji funkcji liczby pomiarów przy pomiarach ciągłych

4.1.6. Identyfikacja charakterystyki statycznej przy pomiarach dyskretnych

Dla określenia warianoji współczynników regresji przy identyfikacji charakterystyki statycznej wzbogacalnika należy wyznaczyć:

$$\operatorname{var} \sum_{1}^{N} e_p(iT_p) \qquad (4.40)$$

bowiem przy pomiarach dyskretnych zachodzi:

$$e_{pi} = e_p(iT_p) \tag{4.41}$$

Można napisać:

$$\frac{1}{N}\sum_{1}^{N} e_p(iT_p) = \frac{1}{NT_p}\sum_{1}^{N} e_p(iT_p)T_p = \frac{1}{T}\sum_{1}^{N} e_p(iT_p) \tag{4.42}$$

Wariancja takiego wyrażenia jest równa:

$$\operatorname{var}\frac{1}{T}\sum_{o}^{N-1} e_p(iT_p)T_p = \frac{T_p^2}{T^2}\sum_{o}^{N-1}\sum_{o}^{N-1} R_{e_p}[(i-j)T_p] \tag{4.43}$$

co dalej można przekształcić do postaci:

$$\operatorname{var}\frac{1}{T}\sum_{o}^{N-1} e_p(iT_p)T_p = 2\frac{T_p^2}{T^2}\sum_{o}^{N-1}(N-i)\,R_{e_p}(iT_p) - \frac{N}{T^2}T_p^2\,R_{e_p}(0) \tag{4.44}$$

Gdy $e_p(t)$ jest przebiegiem stacjonarnym o funkcji autokorelacji typu (4.12), to:

$$\operatorname{var}\frac{1}{T}\sum_{o}^{N-1} e_p(iT_p)T_p = R_{e_p}(0)\left[\frac{2T_p}{T}\left(\frac{1-e^{\alpha T+\alpha T_p}}{1-e^{-\alpha T_p}} + \frac{e^{-\alpha T-\alpha T_p}}{e^{\alpha T_p}-1}\right) - \right.$$

$$\left. \frac{2T_p^2}{T^2}\cdot\frac{e^{\alpha T_p}-e^{\alpha T_p-\alpha T}}{(e^{\alpha T_p}-1)^2} - \frac{T_p}{T}\right] \tag{4.45}$$

Po uwzględnieniu (4.26), (4.27), (4.31), (4.45) otrzymuje się wzory na wariancję współczynników regresji:

$$\operatorname{var} b_o = A_o\left\{R_{e_p}(0)\left[\frac{2T_p}{T}\left(\frac{1-e^{\alpha T_p-\alpha T}}{1-e^{-\alpha T_p}} + \frac{e^{-\alpha T+\alpha T_p}}{e^{\alpha T_p}-1}\right) + \right.\right.$$

$$\left.\left. - \frac{2T_p^2}{T^2}\cdot\frac{e^{\alpha T_p}-e^{-\alpha T+\alpha T_p}}{(e^{\alpha T_p}-1)^2} - \frac{T_p}{T}\right] + \frac{\sigma_n^2 T_p}{T}\right\} \tag{4.46}$$

$$\operatorname{var} b_1 = A_1\left\{R_{e_p}(0)\left[\frac{2T_p}{T}\left(\frac{1-e^{-\alpha(T-T_p)}}{1-e^{-\alpha T_p}} + \frac{e^{-\alpha(T-T_p)}}{e^{\alpha T_p}-1}\right) + \right.\right.$$

$$\left.\left. - \frac{2T_p^2}{T^2}\cdot\frac{e^{\alpha T_p}-e^{-\alpha(T-T_p)}}{(e^{\alpha T_p}-1)^2} - \frac{T_p}{T}\right] + \frac{\sigma_u^2 T_p}{T}\right\} \tag{4.47}$$

Jeżeli uchyby układu pomiarowego podlegają zależności (4.22), to wzory na wariancję współczynników regresji mają postać:

$$\operatorname{var} b_o = A_o\left\{R_{e_p}(0)\left[\frac{2T_p}{T}\left(\frac{1-e^{-\alpha(T-T_p)}}{1-e^{-\alpha T_p}} + \frac{e^{-\alpha(T-T_p)}}{e^{\alpha T_p}-1}\right) + \right.\right.$$

$$\left.\left. - \frac{2T_p^2}{T^2}\cdot\frac{e^{\alpha T_p}-e^{-\alpha(T-T_p)}}{(e^{\alpha T_p}-1)^2} - \frac{T_p}{T}\right] + \frac{\text{const}}{T}\right\} \tag{4.48}$$

$$\operatorname{var} b_1 = A_1\left\{R_{e_p}(0)\left[\frac{2T_p}{T}\left(\frac{1-e^{-\alpha(T-T_p)}}{1-e^{\alpha T_p}} + \frac{e^{-\alpha(T-T_p)}}{e^{\alpha T_p}+1}\right) + \right.\right.$$

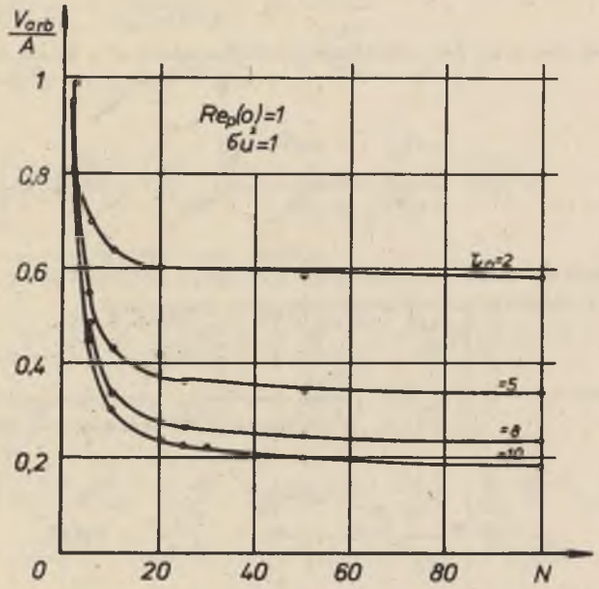
$$\left.\left. - \frac{2T_p^2}{T^2}\cdot\frac{e^{\alpha T_p}-e^{-\alpha(T-T_p)}}{(e^{\alpha T_p}-1)^2} - \frac{T_p}{T}\right] + \frac{\text{const}}{T}\right\} \tag{4.49}$$

Jak widać ze wzorów (4.46), (4.47), (4.48), (4.49) wariancje współczynników regresji przy pomiarach dyskretnych zależą nie tylko od czasu identyfikacji T, ale również od czasu między poszczególnymi pomiarami. Na rys. 4.3 przedstawiono charakterystyki zależności wariancji współczynników regresji funkcji liczby pomiarów N.

4.2. Badania symulacyjne identyfikacji procesu wzbogacania we wzbogacalnikach z cieczą ciężką

4.2.1. Dane do symulacji nadawy

Własności nadawy przyjętej w modelu symulacyjnym charakteryzowane są przez parametry wymienione w punkcie 3.5. Przyjęto nadawę w klasie ziarnowej 80-30 mm i wyróżniono w niej 7 frakcji ciężarowych. Dane analizy dem-



Rys. 4.3. Zależność wariancji współczynników regresji funkcji liczby pomiarów przy pomiarach dyskretnych

symetrycznej i zapopielenie poszczególnych frakcji zestawiono w tablicy 4.1. W oparciu o wyniki badań przedstawionych w pracach [1], [2] przyjęto odchylenie standardowe dla zmian wychodu frakcji i ich zapopielenia jak w tablicy 4.2. Współczynniki tłumienia funkcji autokorelacji dla przebiegu wychodów frakcji i ich zapopielenia przyjęto:

$$\alpha_\gamma = \alpha_\lambda = 0.00267\ \frac{1}{s}$$

Tablica 4.1

Dane analizy densymetrycznej i zapopielenia frakcji przyjętych do symulacji identyfikacji procesu wzbogacania w cieczach ciężkich

Lp.	Frakcja	Wychód	Zapopielenie
1	1.3	0.095	0.0342
2	1.3 - 1.4	0.155	0.05709
3	1.4 - 1.5	0.0695	0.2015
4	1.5 - 1.6	0.0364	0.2965
5	1.6 - 1.8	0.0552	0.4190
6	1.8 - 1.9	0.0374	0.5891
7	1.9	0.5515	0.7285

Tablica 4.2

Odchylenia standardowe dla zmian wychodu frakcji i ich zapopielenia

Lp.	Frakcja	$\sigma_{\gamma_i}/\gamma_i$ %	$\sigma_{\lambda_i}/\lambda_i$ %
1	1.3	10	30
2	1.3 - 1.4	10	30
3	1.4 - 1.5	10	30
4	1.5 - 1.6	15	40
5	1.6 - 1.8	15	40
6	1.8 - 1.9	15	40
7	1.9	20	50

Odchylenie standardowe przebiegu natężenia strugi nadawy założono jako 50% jego wartości średniej, a współczynnik tłumienia funkcji autokorelacji:

$$\alpha_N = 0.003\ \frac{1}{s}.$$

4.2.2. Dane wzbogacalnika

Założono, że w symulowanym wzbogacalniku cieczy ciężkiej zjawisko dyfuzji ziaren ze strefy odpadów do strefy koncentratu jest do pominięcia, a więc $w_i = 0$. Zasadniczymi parametrami procesu wzbogacania są $\frac{s_i}{D_o}$ ($i = 1, 2, \ldots, 7$). Na podstawie badań wzbogacalnika DISA zakładu przeróbczego KWK Knurów oraz danych uogólnionych krzywych wzbogacania [12] wyznaczono wyżej wymienione parametry dla gęstości cieczy ciężkiej równej $1.5.10^3 kg/m^3$ wzbogacania wstępnego oraz $1.8.10^3$ kg/m^3 wzbogacania wtórnego. Otrzymane wyniki przedstawiono w tablicy 4.3.

Tablica 4.3

Wartości stosunku $\frac{s_i}{D_o}$ dla $\delta_1 = 1.5.10^3$ kg/m^3 i $\delta_2 = 1.8.10^3$ kg/m^3 symulowanego wzbogacalnika

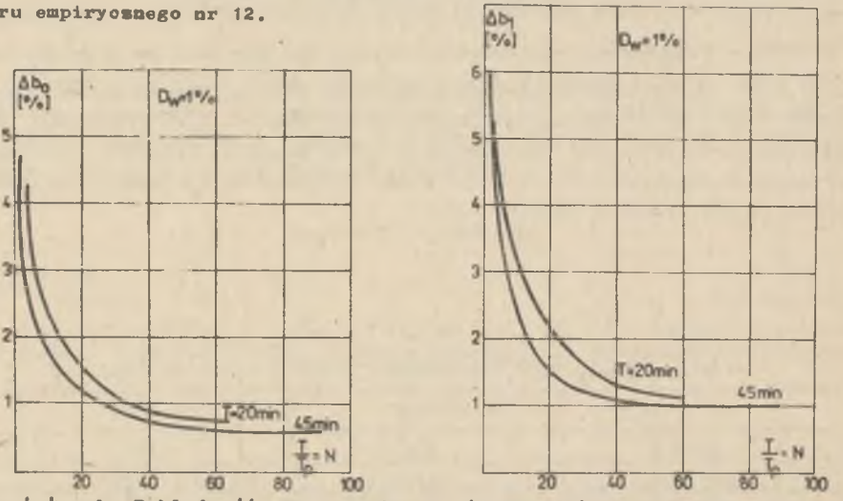
Lp.	Frakcja	$\frac{s_i}{D_o}$ dla δ_1	$\frac{s_i}{D_o}$ dla δ_2
1	1.3	39.81	1000
2	1.3 - 1.4	21.727	1000
3	1.4 - 1.5	.03	1000
4	1.5 - 1.6	0.05012	44.45
5	1.6 - 1.8	0	8.504
6	1.8 - 1.9	0	0.0604
7	1.9	0	0.0142

4.2.3. Wyniki badań identyfikacji charakterystyki wychodu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej przy dyskretnych pomiarach natężenia strug produktów wzbogacania

Celem badań identyfikacji charakterystyki wychodu $\gamma(\delta)$ było wyznaczenie metodą symulacji dokładności wyznaczania współczynników regresji dla następujących funkcji regresji: (patrz tablica 2.1), 2,9,12,19 w zależności od ilości pomiarów N przy ustalonym czasie trwania identyfikacji T, czasu między kolejnymi pomiarami T_p przy określonej liczbie pomiarów oraz dokładności Dw czujników natężenia przepływu produktów wzbogacania. Jako miarę dokładności wyznaczania współczynników regresji b przyjęto stosunek odchylenia standardowego współczynnika do jego wartości średniej:

$$\Delta b = \frac{\sqrt{\text{var } b}}{\bar{b}} \qquad (4.50)$$

Warianoja współczynnika regresji została wyznaczona poprzez wyliczenie średniej wartości otrzymanych różnic $(b - \bar{b})^2$ w wyniku identyfikacji przy 100 różnych realizacjach losowych. Ze względu na ograniczoną objętość pracy i na fakt, że uzyskane wyniki dla pozostałych wzorów empirycznych są podobne, przedstawione zostaną rezultaty badań współczynników regresji dla wzoru empirycznego nr 12.

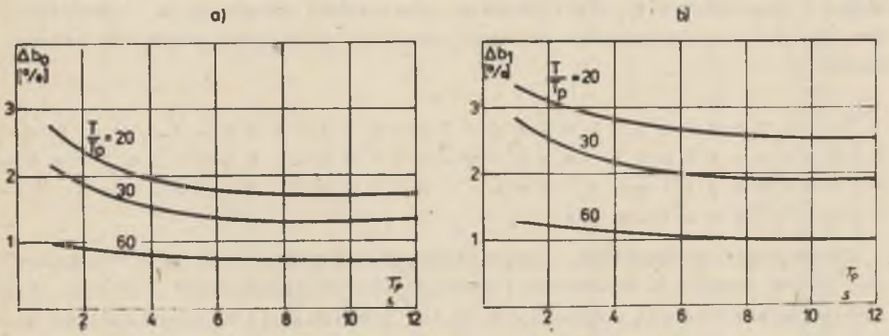


Rys. 4.4 a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla wychodu koncentratu w zależności od liczby dyskretnych pomiarów i czasu trwania identyfikacji

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_o, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

Dla zbadania wpływu ilości pomiarów N przy ustalonym czasie identyfikacji na dokładność wyznaczania współczynników regresji wykonano obliczenia zależności (4.50) dla współczynnika b_o i b_1 dla T = 20 min i T = 45 min. Otrzymane zależności $b_o(N)$, $b_1(N)$ dla charakterystyki wychodu aproksymowanej wzorem o numerze 12 zostały przedstawione na wykresach pokazanych na rys. 4.4. Dokładność wyznaczania współczynników regresji w zakresie N = 3-30 zależy bardzo istotnie od ilości wykonanych pomiarów. Ze wzrostem liczby pomiarów (zmniejszenie czasu pomiędzy poszczególnymi pomiarami) zwiększa się dokładność wyznaczania współczynnika regresji. Zwiększenie liczby pomiarów powyżej 30 nie powoduje już znacznego poprawiania uzyskiwanej dokładności. Uchyb wyznaczania współczynników regresji przy ilości pomiarów powyżej 30 jest mniejszy od 2%.

Współczynniki regresji wzorów 2,9,12 określane są praktycznie z jednakową dokładnością, przy czym współczynniki wzoru 12 dla N > 30 z dokładnością mniejszą od 1%.



Rys. 4.5 a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla wychodu koncentratu w zależności od czasu pomiędzy kolejnymi dyskretnymi pomiarami

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_o, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

Wyniki obliczeń symulacyjnych zależności dokładności wyznaczania współczynników regresji od czasu pomiędzy kolejnymi pomiarami przedstawiono na wykresach rys. 4.5a,b. Dokładność współczynników regresji zależy od czasu pomiędzy pomiarami T_p, szczególnie dla czasów mniejszych od 40 s. Zależność ta jest tym większa, im mniejsza jest liczba pomiarów N.

Zwiększenie czasu T_p pociąga za sobą zwiększenie dokładności wyznaczania współczynników regresji, jednak dla czasów T_p większych od 40 s pozostaje ona praktycznie stała. Zwiększenie liczby pomiarów N powoduje zawsze zwiększenie dokładności identyfikacji. Porównując wykresy dla wzorów nr 2,9,12 można stwierdzić, że dokładność wyznaczania współczynników re-

gresji jest praktycznie taka sama, jednak współczynniki wzoru nr 12 zostają zawsze wyznaczone najdokładniej. Współczynniki wzoru nr 19 natomiast wyznaczone są ze znacznym uchybem.

Wyniki obliczeń symulacyjnych zależności dokładności wyznaczania współczynników regresji od dokładności czujników pomiarowych przedstawiono na rys. 4.6a,b. Niedokładność wyznaczania współczynników regresji rośnie liniowo ze wzrostem niedokładności czujników natężenia przepływu produktów wzbogacania. Przyrost uchybu współczynników jest większy dla mniejszej liczby pomiarów wykonanych w czasie identyfikacji (nachylenie prostej jest tym większe, im mniejsza jest liczba wykonanych pomiarów). Przyrost uchybu współczynnika b_o wynosi 1% przy wzroście niedokładności wskazań czujnika natężenia przepływu urobku o 1%, przy liczbie pomiarów równej 20, natomiast przy liczbie pomiarów równej 30 wynosi 0,5%, a przy liczbie pomiarów równej 40 jest mniejszy od 0,5%.

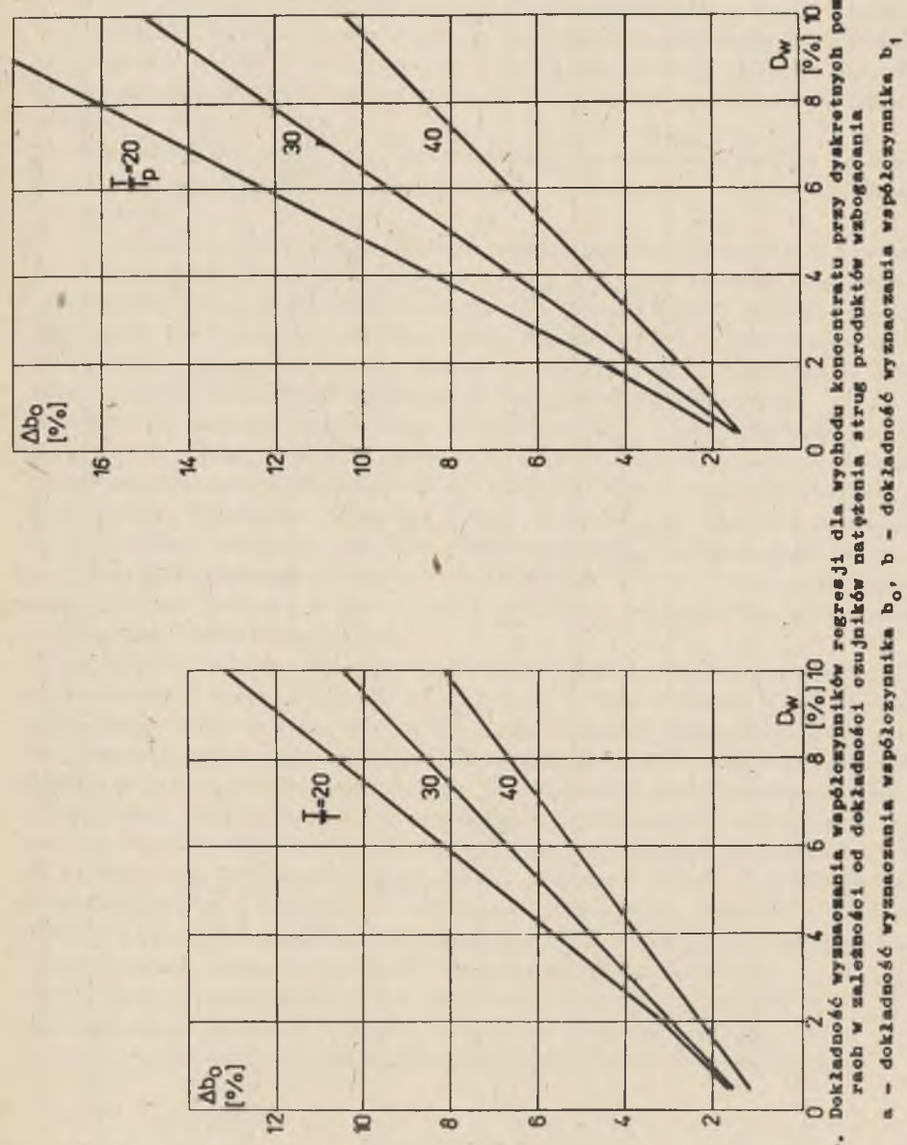
Niedokładność wyznaczania współczynników regresji wzoru nr 19 jest większa. Zależność niedokładności wyznaczania współczynników regresji od niedokładności wskazań czujników przepływu produktów wzbogacania jest nieliniowa i charakteryzuje się większymi przyrostami uchybu przy 1-procentowym wzroście niedokładności wskazań czujników przepływu produktów wzbogacania.

4.2.4. Wyniki badań identyfikacji charakterystyki zapopielenia koncentratu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej metodą symulacji

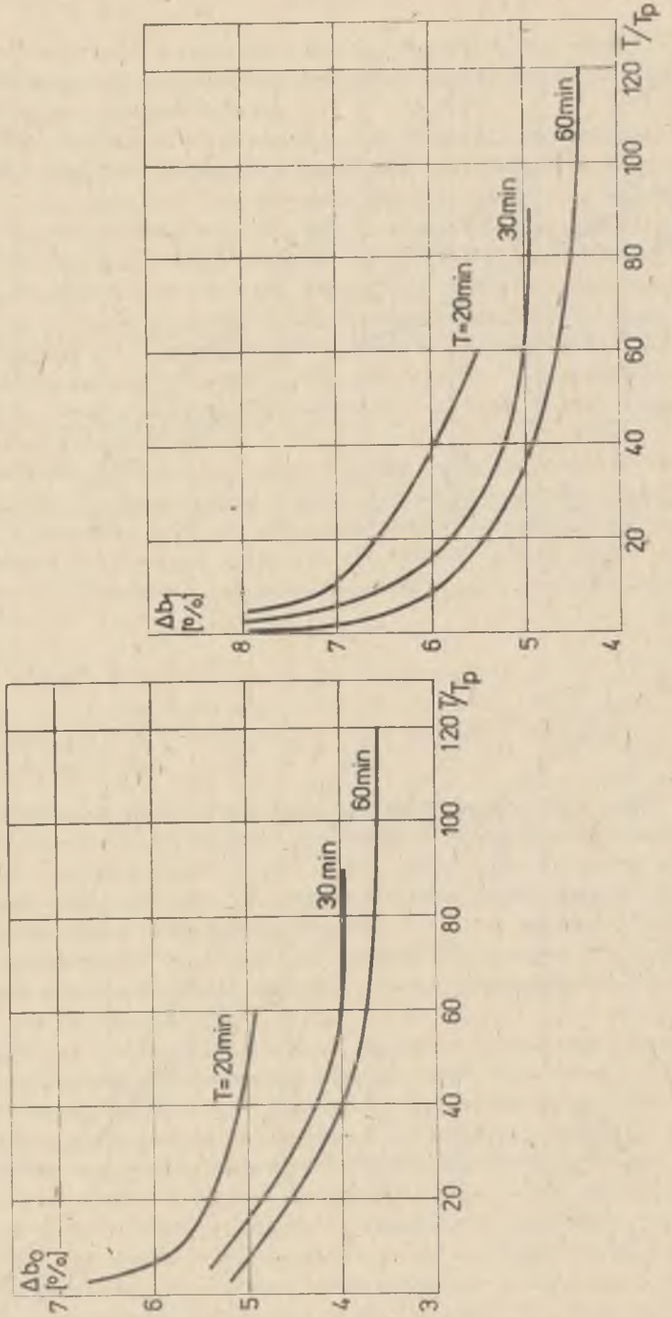
Celem badań identyfikacji charakterystyki zapopielenia było wyznaczenie metodą symulacji dokładności wyznaczania współczynników regresji dla następujących funkcji regresji: 7,12,19 (tablica 3.1) w zależności od liczby wykonywanych pomiarów N przy określonym czasie trwania identyfikacji, od czasu między kolejnymi pomiarami T_p przy zadanej liczbie pomiarów oraz dokładności D_w czujników natężenia przepływu produktów wzbogacania. Jako miarę dokładności (niedokładności) wyznaczania współczynników regresji przyjęto wyrażenie (4.50).

Podobnie jak w poprzednim punkcie otrzymane wyniki badań zostaną przedstawione dla wzoru empirycznego o numerze 12.

Dla zbadania wpływu ilości pomiarów N przy ustalonym czasie trwania identyfikacji na niedokładność wyznaczania współczynników regresji wykonano obliczenia symulacyjne zależności (4.50) dla różnej liczby pomiarów przy ustalonym czasie trwania identyfikacji (rys. 4.7). Otrzymane wyniki przedstawiono na wykresach 4.7a,b. Niedokładność wyznaczania współczynników regresji dla wzorów o numerach 7 i 12 ze wzrostem N maleje; im większa liczba pomiarów, tym dokładniejsza staje się możliwość wyznaczania współczynników regresji. Szczególnie w zakresie N od 3 - 40 zwiększanie liczby pomiarów powoduje znaczne poprawienie dokładności. Powyżej 40 pomiarów



Rys. 4.6a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla wychodu koncentratu przy dyskretnych pomiarach w zależności od dokładności czujników natężenia strug produktów wzbogacania
a - dokładność wyznaczania współczynnika b_o, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1



Rys. 4.7a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla zapopielenia koncentratu w zależności od liczby dyskretnych pomiarów

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

praktycznie dokładność wyznaczania współczynników regresji nie zależy już od liczby pomiarów. Jak można dalej zauważyć, zwiększenie czasu trwania identyfikacji od 20 - 30 min zwiększa dokładność wyznaczania współczynników regresji prawie o 1%, natomiast zwiększenie czasu z 30 do 60 min, czyli zwiększenie dwukrotne czasu trwania identyfikacji, zwiększa dokładność zaledwie o 0,5%.

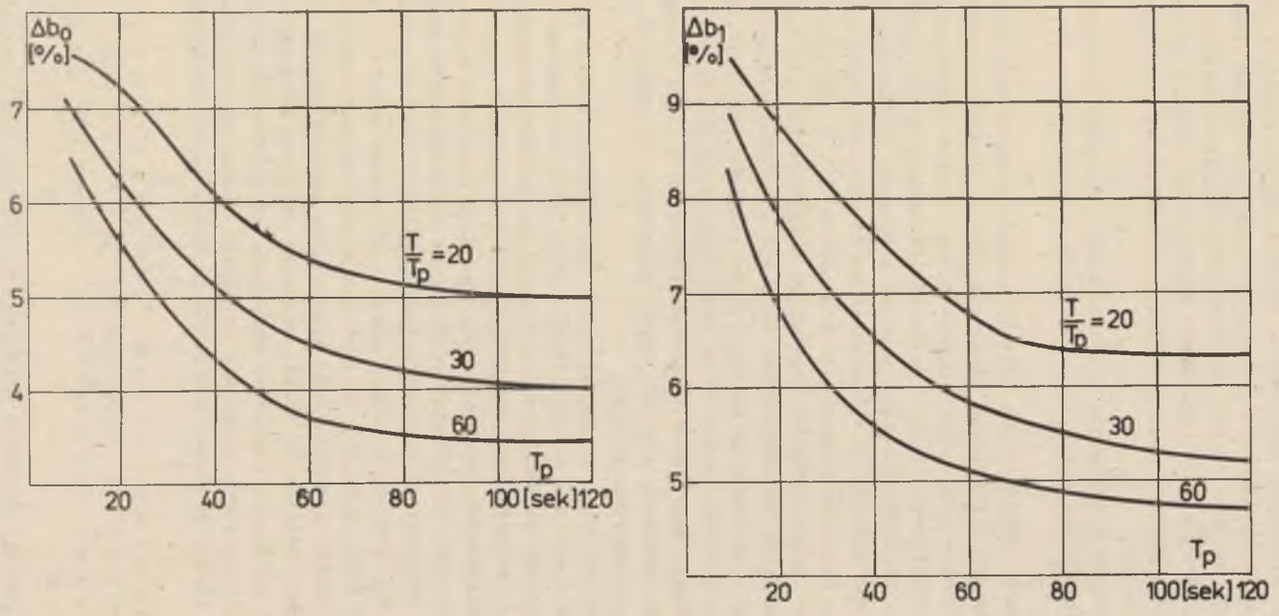
Niedokładność wyznaczania współczynników regresji dla wzoru o numerze 19, w tym samych warunkach jak dla wzorów o numerach 7 i 12, jest znacznie większa.

Dla zbadania wpływu czasu trwania pomiaru zapopielenia pobranej próbki na niedokładność wyznaczania współczynników regresji wykonano obliczenia symulacyjne jak w poprzednich punktach dla różnych czasów pobranej próbki węgla przy określonej liczbie pomiarów. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 4.8a,b. Zwiększenie czasu pomiaru pobranych próbek węgla dosyć znacznie zwiększa dokładność wyznaczania współczynników regresji.
Zależność ta zachodzi szczególnie dla czasów T_p w zakresie 10-60 s. Zwiększenie czasu pomiaru próbki powyżej 60 s praktycznie nie zwiększa dokładności wyznaczania współczynników regresji od ilości pomiarów; zależność jest większa w zakresie mniejszej liczby pomiarów, np. dla współczynnika b_0 zwiększenie liczby pomiarów od 20-30 przy czasie trwania pomiaru zapopielenia próbki równym 60 s zwiększa dokładność o 1,5%, natomiast zwiększenie liczby pomiarów z 30-60, czyli dwukrotne, prowadzi do zwiększenia dokładności identyfikacji o 1%.

Ze względu na fakt, że zapopielenie dla gęstości cieczy ciężkiej ξ_2 wyznacza się w oparciu o wzory (4.8), (4.9) i (4.11) oraz że w postać funkcyjną tych wzorów wchodzą natężenia strug produktów wzbogacania, jest sprawą oczywistą, że dokładność wyznaczania współczynników regresji będzie zależała od dokładności czujników. Dla zbadania tego wpływu wykonano obliczenia symulacyjne dokładności wyznaczania współczynników regresji w zależności od dokładności czujników przy ustalonej liczbie pomiarów N i czasu trwania T_p pomiaru pobranej próbki. Otrzymane wyniki przedstawiono na wykresach (rys. 4.9a,b). Ze wzrostem niedokładności wskazań czujników wzrasta nieliniowo niedokładność wyznaczania współczynników regresji. Zwiększenie liczby pomiarów (z 30-40) znacznie zwiększa dokładność identyfikacji, jeśli wskazania czujników obarczone są uchybem większym od 4%. Jeśli wskazania czujników natężenia przepływu urobku są dokładne ($D_w < 1\%$), zwiększenie liczby pomiarów nie poprawia dokładności identyfikacji.

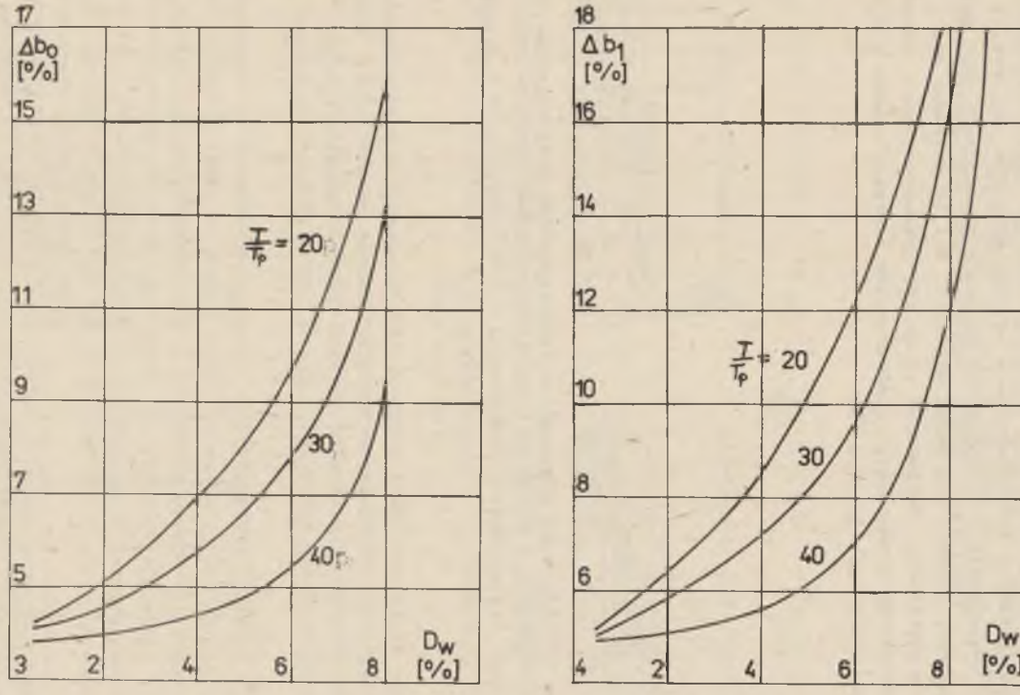
4.2.5. Wyniki badań identyfikacji charakterystyki wychodu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej przy pomiarach ciągłych

Podobnie jak dla pomiarów dyskretnych, wykonano obliczenia symulacyjne dla określenia dokładności wyznaczania współczynników regresji wzorów o



Rys. 4.8a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla zapopielenia koncentratu w zależności od czasu pomiaru pobranej próbki węgla

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_o, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

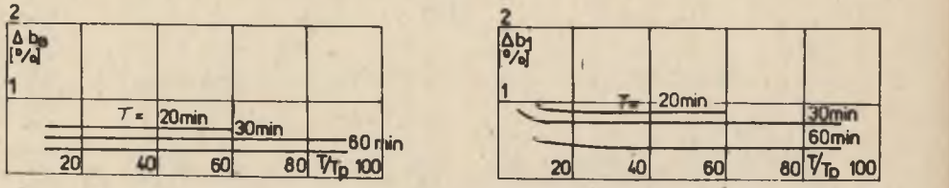


Rys. 4.9a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla zapopielenia koncentratu w zależności od dokładności czujników natężenia strug produktów wzbogacania

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_o, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

numerach 2,9,12,19 oraz zbadano jej zależność od czasu uśredniania T_p, liczby wykonanych pomiarów N oraz dokładności czujników pomiarowych natężenia przepływu produktów wzbogacania. Rezultaty badań zostały przedstawione dla wzoru nr 12.

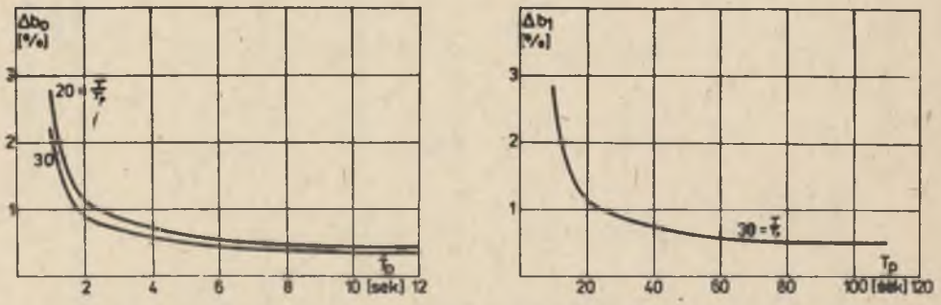
Otrzymane wyniki obliczeń symulacyjnych dokładności wyznaczania współczynników regresji w zależności od liczby pomiarów przy określonym czasie trwania identyfikacji przedstawiono w postaci wykresów na rys. 4.10a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji praktycznie nie zależy od liczby pomiarów, jedynie dla małej wartości $N < 10$ zwiększa się niedokładność identyfikacji. Dokładność ta zależy jednak od czasu identyfikacji. Niedokładność wyznaczania współczynników regresji wzorów 2,9,12 dla $N > 10$ jest zawsze mniejsza od 1%.



Rys. 4.10a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla wychodu koncentratu w zależności od liczby ciągłych pomiarów

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

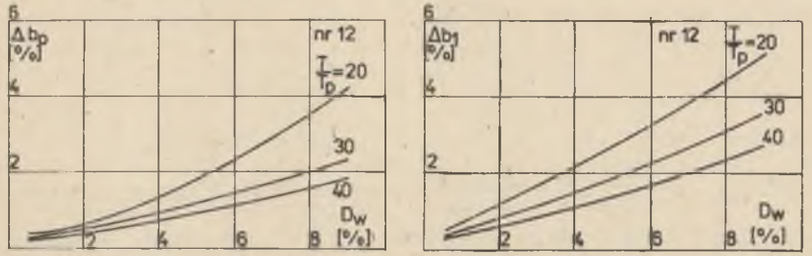
Otrzymane wyniki obliczeń symulacyjnych wyznaczania współczynników regresji w zależności od czasu uśredniania jednego pomiaru przy ustalonej liczbie pomiarów przedstawiono w postaci wykresów przedstawionych na rys. 4.11a,b. Dokładność ta praktycznie nie zależy od czasu uśredniania jednego pomiaru, gdy $T_p < 20$ s. Dla czasu uśredniania $T_p < 20$ s wyniki wyznaczania współczynników regresji obarczone są znacznie większym uchybem.



Rys. 4.11a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla wychodu koncentratu w zależności od czasu uśredniania pojedynczego pomiaru

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_0, d - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

Otrzymane wyniki obliczeń symulacyjnych w zależności od dokładności wskazań czujników natężenia przepływu produktów wzbogacania przedstawione w postaci wykresów na rys. 4.12a,b. Istnieje dosyć znaczna zależność dokładności wyznaczania współczynników od dokładności wskazań czujników. Zależność ta jest większa przy mniejszej liczbie pomiarów. Zwiększenie dokładności wskazań znacznie zmniejsza uchyby identyfikacji.



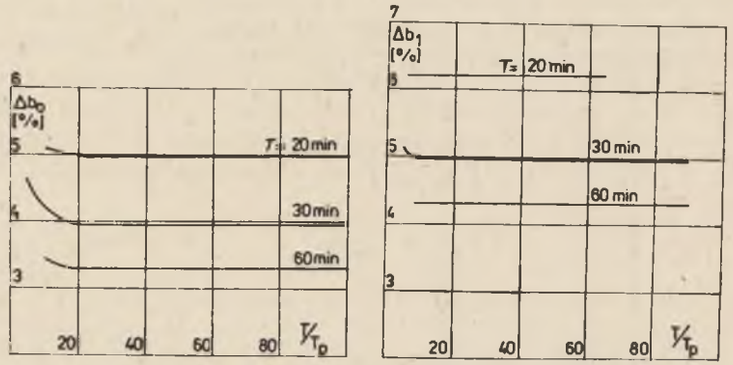
Rys. 4.12a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla wychodu koncentratu w zależności od dokładności czujników natężenia strug produktów wzbogacania przy pomiarach ciągłych

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

4.2.6. Wyniki badań identyfikacji charakterystyki zapopielenia koncentratu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej przy pomiarach ciągłych

Przebadano dokładność wyznaczania współczynników regresji podczas identyfikacji charakterystyki zapopielenia koncentratu przeprowadzonej w oparciu o pomiary ciągłe zapopielenia i natężenia przepływu produktów wzbogacania w zależności od ilości pomiarów N, czasu uśrednienia pojedynczego pomiaru T_p oraz dokładności czujników natężenia przepływu produktów wzbogacania. Analizy dokonano dla wzorów o numerach 7,12,19, a rezultaty badań przedstawiono dla wzoru nr 7.

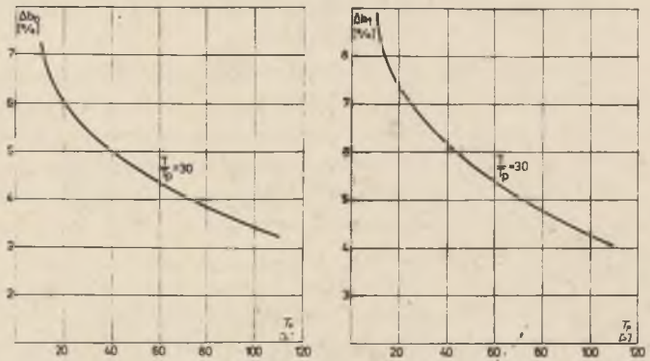
Otrzymane wyniki obliczeń dokładności wyznaczania współczynników regresji w zależności od liczby pomiarów przy określonym czasie trwania identyfikacji przedstawiono w postaci wykresów na rysunku 4.13a,b. Dla czasu identyfikacji $T > 30$ min dokładność identyfikacji praktycznie nie zależy od liczby przeprowadzonych pomiarów. Dla $T = 20$ min zależność ta jest już znaczna i niedokładność zwiększa się ze zmniejszeniem liczby pomiarów.



Rys. 4.13a.b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla zapopielenia koncentratu w zależności od liczby ciągłych pomiarów

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

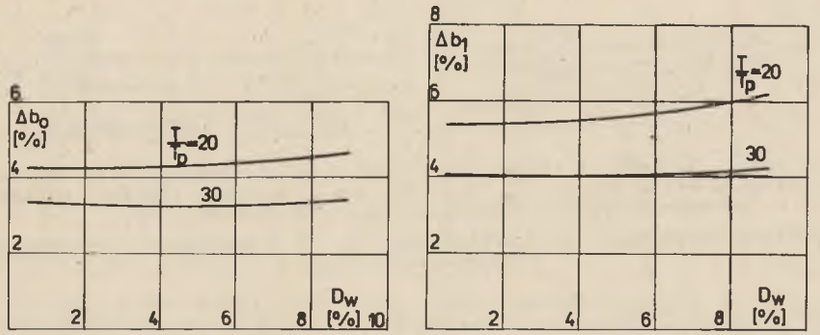
Otrzymane wyniki obliczeń dokładności wyznaczania współczynników regresji przy pomiarach ciągłych w zależności od czasu uśredniania pojedynczego pomiaru badań symulacyjnych przedstawiono w postaci wykresów na rys. 4.14a,b. Na rysunkach tych można zauważyć znaczną zależność dokładności współczynników regresu od czasu pojedynczego pomiaru. Dokładność identyfikacji jest większa, gdy czas ten jest stosunkowo duży.



Rys. 4.14a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla zapopielenia koncentratu w zależności od czasu uśredniania pojedynczego pomiaru (przy pomiarach ciągłych)

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

Otrzymane wyniki obliczeń badań symulacyjnych dokładności wyznaczania współczynników regresji przy pomiarach ciągłych w zależności od dokładności czujników natężenia przepływu produktów wzbogacania przedstawiono w postaci wykresów na rys. 4.15a,b. Można tu zauważyć, że dokładność wyznaczania współczynników nie zależy praktycznie do dokładności czujników natężenia przepływu urobku w zakresie do 7%. Dotyczy to przede wszystkim współczynników wzorów 7 i 12, natomiast dla wzoru 19 zależność ta jest znacznie większa.



Rys. 4.15a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla zapopielenia koncentratu w zależności od dokładności czujników natężenia strug produktów wzbogacania (przy pomiarach ciągłych)

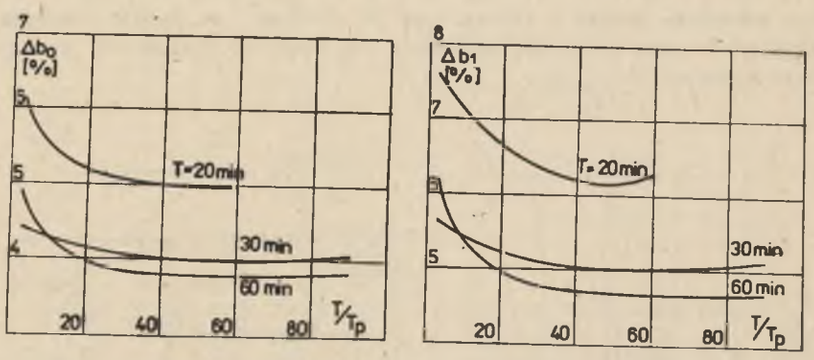
a - dokładność wyznaczania współczynnika b_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

4.2.7. Wyniki badań identyfikacji charakterystyki zapopielenia w funkcji gęstości cieczy ciężkiej przy pomiarach ciągłych natężenia strug i dyskretnych pomiarach zapopielenia produktów wzbogacania

Przebadano dokładność wyznaczania współczynników regresji podczas identyfikacji charakterystyki zapopielenia koncentratu w oparciu o ciągłe pomiary natężenia strug i dyskretne pomiary zapopielenia produktów wzbogacania w zależności od ilości pomiarów czasu uśredniania pojedynczego pomiaru oraz dokładności czujników natężenia przepływu produktów wzbogacania. Analizy dokonano dla wzorów jak w poprzednich punktach (7,12,19).

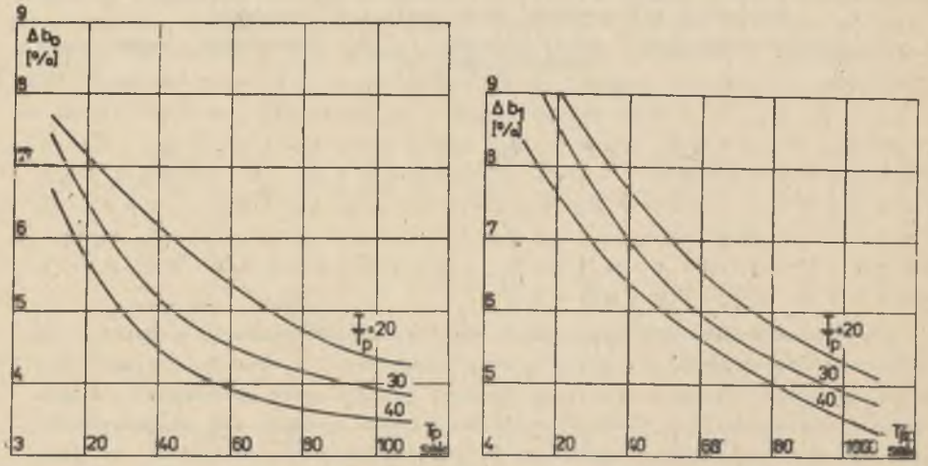
Otrzymane wyniki dokładności obliczeń wyznaczania współczynników regresji w zależności od liczby pomiarów przy określonym czasie trwania iden-

tyfikacji przedstawiono na rys. 4.16a,b. Dokładność identyfikacji dla liczby pomiarów większej od 20 jest praktycznie stała.



Rys. 4.16a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla zapopielenia koncentratu w zależności od liczby pomiarów (przy ciągłym pomiarze natężenia strug i dyskretnym pomiarze zapopielenia)

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

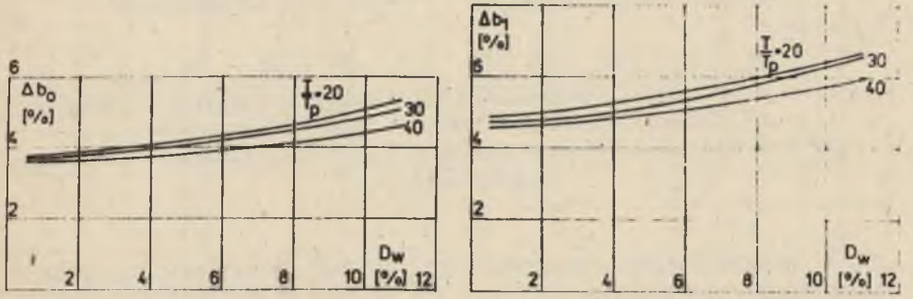


Rys. 4.17a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla zapopielenia koncentratu w zależności od czasu pojedynczego pomiaru (przy ciągłym pomiarze natężenia strug i dyskretnym pomiarze zapopielenia)

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

Otrzymane wyniki obliczeń dokładności wyznaczania współczynników regresji w zależności od czasu pojedynczego pomiaru przedstawiono na rys.4.17a,b. Podobnie jak w poprzednich sposobach pomiaru dokładność wyznaczania współczynników regresji dosyć znacznie zależy od czasu pojedynczego pomiaru.

Otrzymane wyniki obliczeń dokładności wyznaczania współczynników regresji w zależności od dokładności czujników natężenia przepływu produktów wzbogacania przedstawiono na rys. 4.18a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji zależy od dokładności czujników natężenia strug produktów wzbogacania. Zależność ta jest jednak znacznie mniejsza niż przy dyskretnym pomiarze przepływu tych strug.

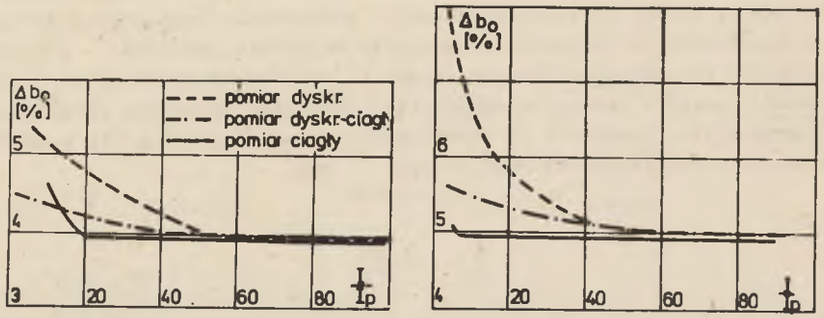


Rys. 4.18a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla zapopielenia koncentratu w zależności od dokładności czujników natężenia strug produktów wzbogacania (przy ciągłych pomiarach natężenia strug i dyskretnym pomiarze zapopielenia)

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

4.2.8. Porównanie dokładności wyznaczania współczynników regresji przy różnych metodach pomiarowych

Dla porównania dokładności wyznaczania współczynników regresji przy różnych metodach pomiarowych naniesiono na jeden wykres zależności dokładności od liczby pomiarów przy tym samym czasie identyfikacji T dla różnych sposobów pomiarów (rys. 4.19a,b). Jak widać, dla $N < 40$ najdokładniejszą metodą jest metoda przy ciągłym pomiarze zapopielenia i natężenia strug produktów wzbogacania, a najmniej dokładna jest metoda przy dyskretnym pomiarze zapopielenia i natężenia strug. Dla liczby pomiarów $N > 40$ dokładność wszystkich metod jest praktycznie ta sama.



Rys. 4.19a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji w zależności od liczby pomiarów przy różnych metodach pomiarowych

a - dokładność wyznaczania współczynnika b_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika b_1

4.3. Badania symulacyjne identyfikacji procesu wzbogacania w trójproduktowej osadzarce

4.3.1. Dane do symulacji nadawy

Własności nadawy przyjętej w modelu symulacyjnym charakteryzowane są przez parametry wymienione w punkcie 3.5. Przyjęto nadawę w klasie ziarnowej 30-10 mm i wyróżniono w niej trzy strefy ciężarowe. Dane analizy densymetrycznej i zapopielenia poszczególnych frakcji przedstawiono w tablicy 4.4. W oparciu o wyniki badań przedstawionych w pracach [1,2] przyjęto

Tablica 4.4

Dane analizy densymetrycznej i zapopielenia frakcji przyjętych do symulacji identyfikacji procesu wzbogacania w trójproduktowej osadzarce

Lp.	Frakcja $kg/m^3 \cdot 10^3$	Wychód γ %	Zapopielenie λ %
1	< 1.4	38.77	3.78
2	1.4 - 1.9	6.53	27.69
3	≥ 1.9	54.7	73.07

odchylenie standardowe dla zmian wychodu frakcji i ich zapopielenia jak w tablicach 4.5. Współczynniki tłumienia funkcji autokorelacji [25,35] dla przebiegów wychodów frakcji jak i ich zapopielenia zostały przyjęte:

$$\alpha_\gamma = \alpha_\lambda = 0.00267 \frac{1}{s}$$

Odchylenie standardowe przebiegu natężenia strugi nadawy przyjęto 5%, a współczynnik tłumienia funkcji autokorelacji:

$$\alpha_N = 0.003 \frac{1}{s}$$

Tablica 4.5

Odchylenia standardowe wychodów i zapopielenia przyjętej nadawy do symulacji

Lp.	Frakcja kg/m^3	Odchylenie standardowe dla wychodu %	Odchylenie standardowe zapopielenia %
1	< 1.4	12	22
2	1.4 - 1.9	7	19
3	> 1.9	14	5

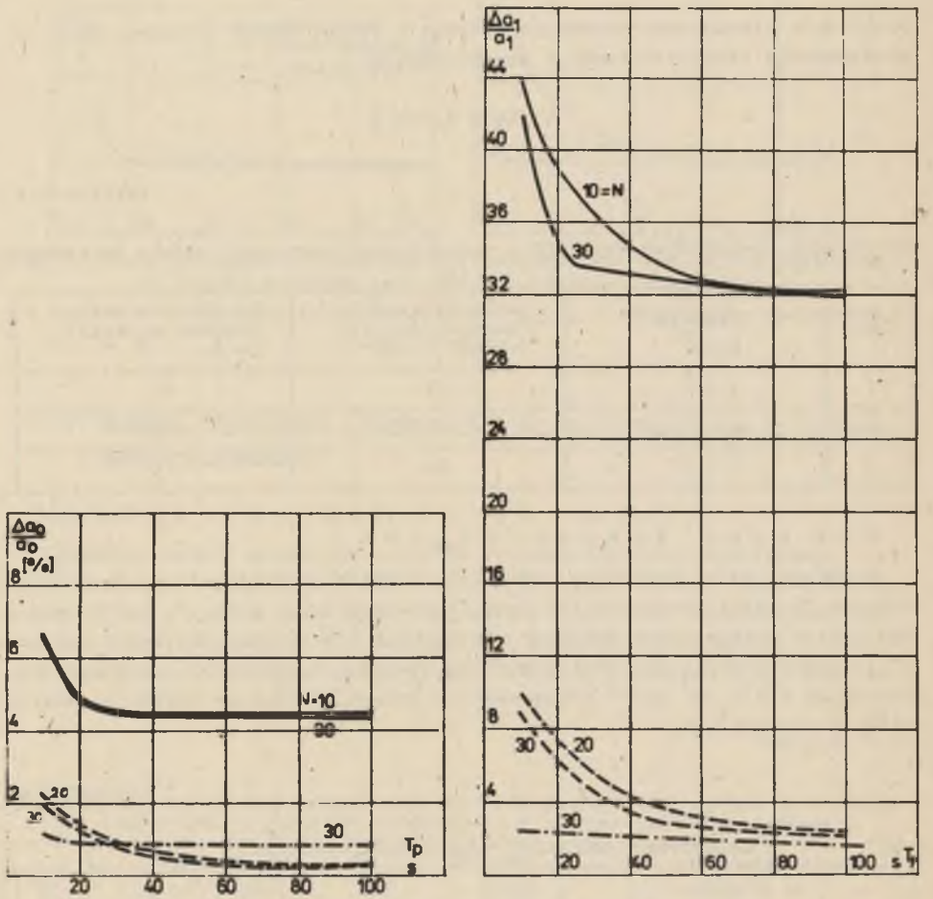
4.3.2. Dane wzbogacalnika

Założono, że w symulowanej osadzarce zjawisko dyfuzji ziaren ze strefy odpadów do strefy koncentratów jest do pominięcia, a więc $w_1 = 0.W$ oparciu o dane uogólnionych krzywych wzbogacania [12] wyznaczono wyżej wymienione parametry dla gęstości rozdziału równej $1,9.10^3$ kg/m^3 wzbogacania wstępnego i $1,4.10^3$ kg/m^3 wzbogacania wtórnego. Otrzymane wyniki przedstawiono w tablicy 4.6.

Tablica 4.6

Dynamiczne parametry symulowanej osadzarki

Lp.	Frakcja $kg/m^3 \cdot 10^3$	$\frac{S_1}{D_0}$ dla $\sigma = 1,4.10^3$ kg/m^3	$\frac{S_1}{D_0}$ dla $\sigma = 1,9.10^3$ kg/m^3
1	≤ 1.4	0.4072	0.1000
2	1.4 - 1.9	0.011	1.769
3	> 1.9	0.0011	0.08



Rys. 4.20a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji wzoru nr 3 w zależności od czasu uśrednienia pojedynczego pomiaru

a - dokładność wyznaczania współczynnika a_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika a_1

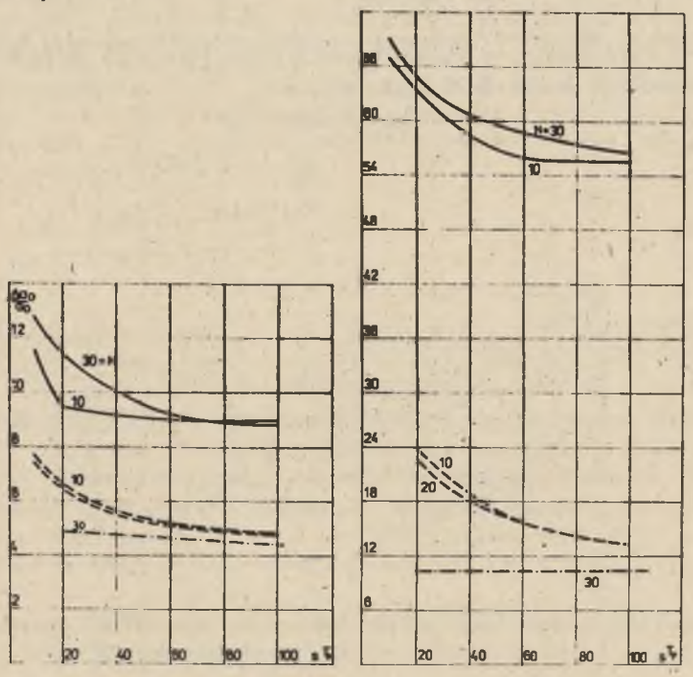
4.3.3. Wyniki badań metodą symulacji charakterystyki wychodu koncentratu w funkcji jego zapopielenia

Celem badań identyfikacji charakterystyki wychodu w funkcji jego zapopielenia było wyznaczenie metodą symulacji dokładności wyznaczania współczynników regresji dla funkcji regresji przedstawionych w tablicy 2.14 o numerach 3,7,11,13. Za miarę dokładności, podobnie jak dla charakterystyk wzbogacalników z cieczą ciężką, przyjęto wzór (4,50).

Przebadano wpływ czasu pojedynczego pomiaru i ich ilości na dokładność identyfikacji, przy czym założono, że pomiary odbywają się w sposób ciągły. Badania wykonano w trzech przypadkach:

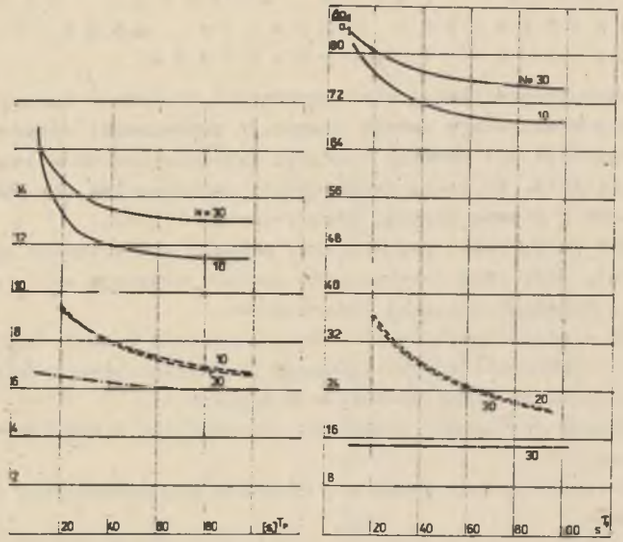
- dla nadawy o parametrach probabilistycznych jak w tabl. 4.5,
- dla nadawy całkowicie ustabilizowanej (o stałych zawartościach natężenia i zapopielenia strug produktów wzbogacania),
- przy założeniu znajomości średniego zapopielenia strug koncentratu, półproduktów.

Wyniki obliczeń podano w postaci wykresów przedstawionych na rysunkach 4.20 - 4.23a,b.



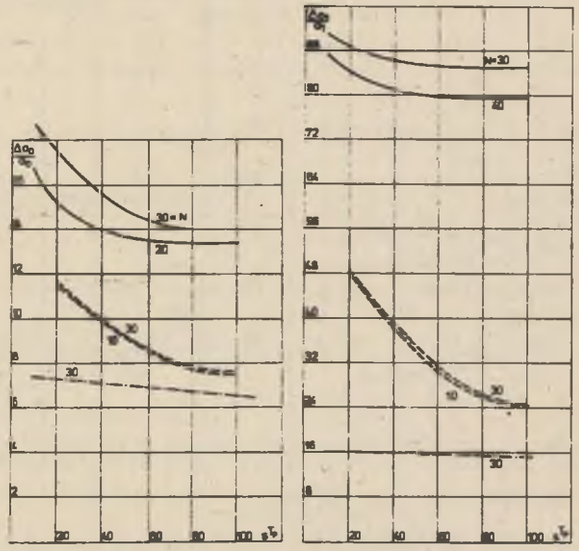
Rys. 4.21a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji wzoru nr 7 w zależności od czasu uśrednienia pojedynczego pomiaru

a - dokładność wyznaczania współczynnika a_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika a_1



Rys. 4.22a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji wzoru nr 11 w zależności od czasu uśrednienia pojedynczego pomiaru

a - dokładność wyznaczania współczynnika a_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika a_1



Rys. 4.23a,b. Dokładność wyznaczania współczynników regresji wzoru nr 13 w zależności od czasu uśrednienia pojedynczego pomiaru

a - dokładność wyznaczania współczynnika a_0, b - dokładność wyznaczania współczynnika a_1

Jak widać z wykresów, przy pomiarach z nadawą nieustabilizowaną (linie ciągłe) niedokładność wyznaczania współczynników regresji, a szczególnie współczynnika b_1 jest bardzo duża, tym większa, im wykładnik potęgi równania regresji jest większy. Zwiększenie czasu pojedynczego pomiaru powyżej 40 s nie powoduje praktycznie zwiększenia dokładności wyznaczania współczynników regresji. Podobnie zwiększenie liczby pomiarów powyżej 10 nie wpływa na dokładność identyfikacji.

Dokładność wyznaczania współczynników regresji dla nadawy całkowicie ustabilizowanej jest znacznie większa (linie kreskowane). Uchyby w tym przypadku wprowadzone są jedynie przez czujniki pomiarowe. Ponieważ całkowite ustabilizowanie nadawy jest niemożliwe pod względem jej jakości, otrzymane wyniki są granicą dokładności wyznaczania współczynników regresji przy stabilizacji jakości nadawy.

Zasadniczo największą dokładność wyznaczania współczynników regresji otrzymuje się w przypadku przeprowadzenia identyfikacji ze znajomością średnich wartości zapopielenia produktów wzbogacania, mimo że nadawa przychodząca na osadzarkę miała te same parametry probabilistyczne jak w przypadku z ciągłym pomiarem zapopielenia strug produktów wzbogacania. Przypadek ten można traktować tak, jak gdyby w układzie trójproduktowej osadzarki był układ automatycznej regulacji zapopielenia koncentratu i półproduktu, przy czym uchyb statyczny regulacji jest równy zeru, natomiast jako wartości zapopielenia strug do identyfikacji przyjęto wartości zadane. I w tym przypadku dokładność identyfikacji nie zależy od liczby pomiarów, gdy $N > 10$. Również czas pojedynczego pomiaru nie wpływa praktycznie na wyniki identyfikacji.

4.3.4. Uwagi i wnioski z badań symulacyjnych procesu wzbogacania w osadzarce

Do symulacji identyfikacji procesu wzbogacania w trójproduktowej osadzarce przyjęto nadawę o parametrach probabilistycznych, jakie otrzymano w wyniku badań uzyskanych w zakładach przeróbczych, przy czym nadawa ta nie była stabilizowana pod względem jakości. Dla takiej nadawy dokładność wyznaczania współczynników regresji jest niewystarczająca (szczególnie jeśli chodzi o współczynnik regresji b_1). Zwiększenie dokładności identyfikacji procesu wzbogacania w osadzarce wymaga, aby nadawa była stabilizowana pod względem jakości.

4.4. Uwagi i wnioski dotyczące uzyskanych wyników badań identyfikacji procesów wzbogacania węgla

Przyjmując w punkcie 4.1.1 uproszczenia modelu identyfikacji procesu wzbogacania, można było wyznaczyć wzory określające zależności dla wariancji współczynników regresji przy identyfikacji metodą najmniejszych kwa-

dratów przy różnych sposobach wykonywania pomiarów (pomiary ciągłe,dyskretne). Wzory te podają zależności pomiędzy wariancją współczynników regresji a parametrami takimi, jak: czas pomiaru, czas identyfikacji,liczba wykonanych pomiarów oraz dokładność zastosowanych czujników pomiarowych. W celu wykonania rachunkowej analizy w oparciu o wyprowadzone wzory konieczna jest znajomość własności stochastycznych zakłócenia e(t), wariancji, współczynnika tłumienia funkcji autokorelacji.

Innym sposobem badania algorytmu identyfikacji metodą najmniejszych kwadratów jest symulacja. Opracowane dynamiczne modele matematyczne procesów wzbogacania nadawy i czujników pomiarowych przybliżają rozpatrywane zagadnienia znacznie bardziej do rzeczywistości, chociaż i tu trzeba było wprowadzić szereg założeń upraszczających przy opisie matematycznych elementów modelu. Jak już stwierdzono we wnioskach z poprzedniego rozdziału,dla wykonywania obliczeń symulacyjnych trzeba przyjąć bardzo dużą liczbę parametrów określających stochastyczne i statyczne własności: nadawy,wzbogacalnika, czujników pomiarowych oraz parametrów algorytmu identyfikacji.

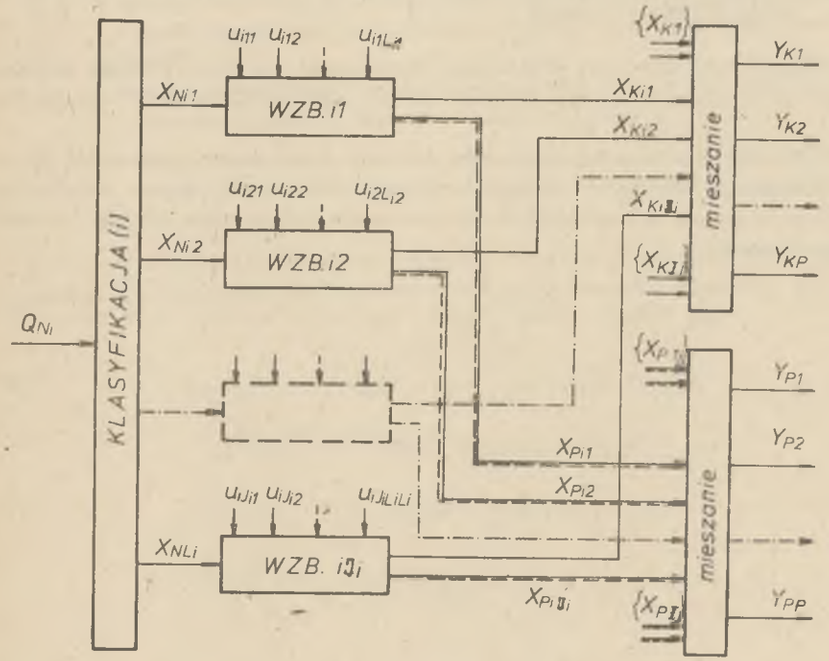
Można stwierdzić, że badana dokładność identyfikacji zależy praktycznie od wszystkich tych parametrów. Rozpatrzenie tak dużego zagadnienia jest niemożliwe do wykonania ze względu na długi czas wykonywania obliczeń symulacyjnych. Ograniczono się więc do zbadania wpływu parametrów algorytmu identyfikacji takich, jak: czas trwania pojedynczego pomiaru,czas identyfikacji oraz dokładność czujników mierzących natężenie strug urobku na dokładność identyfikacji. Zdaniem autora otrzymane wyniki stanowią wstępną informację dla projektowania oprzyrządowania systemu sterowania w celu jego doświadczalnej weryfikacji. Za takim traktowaniem otrzymanych wyników przemawia fakt, że dane probabilistyczne do modelu zostały zaczerpnięte z opublikowanych dotychczas nielicznych badań. Jest jednak sprawą oczywistą, że za pomocą opracowanego przez autora modelu symulacyjnego można przeanalizować wpływ pozostałych parametrów na dokładność identyfikacji oraz skorygować wyniki w przypadku uzyskania dokładniejszych informacji o parametrach probabilistycznych symulowanego procesu.

5. OPTYMALIZACJA STATYCZNA PROCESU WZBOGACANIA WĘGLA W SYSTEMIE AUTOMATYCZNEGO STEROWANIA

5.1. Wstęp

Z punktu widzenia planów produkcyjnych zakładu przeróbczego problem optymalizacji procesu produkcyjnego węgla daje się przedstawić jako zagadnienie optymalizacji statycznej. W zależności od zasięgu optymalizacji dla celów automatycznego sterowania można wyróżnić optymalizację:

- przy ustalonej i niezmiennej strukturze technologicznej procesu produkcyjnego,
- przy założeniu możliwości zmiany struktury technologicznej.



Rys. 5.1. Schemat blokowy wydzielonego systemu zakładu przeróbczego

W pracy przyjęto, że w systemach automatycznego sterowania zmiany struktury będą ograniczone do zmian sposobu mieszania produktów wzbogacania (produktów wyjściowych z poszczególnych maszyn wzbogacających). Zagadnienie doboru struktury w szerszym sensie wchodzi w zakres projektowania schematu technologicznego zakładu i wykracza poza zakres pracy.

W ogólnym schemacie blokowym zakładu przeróbczego węgla wydzielić można równoległe pracujące systemy. Na rys. 5.1 przedstawiono schemat blokowy takiego systemu. Na początku następuje klasyfikacja wstępna nadawy węgla surowego, a następnie strugi poszczególnych frakcji ziarnowych kierowane są do odpowiednich zespołów maszynowych, które ogólnie będziemy nazywać wzbogacalnikami. Tu następuje rozdział nadawy węgla z parametrami rozdziału. W dalszej części przewiduje się mieszanie poszczególnych strug wyjściowych wzbogacalników w celu otrzymania produktów końcowych o pożądanych własnościach.

Przy niezmiennej strukturze mieszania produktów wzbogacania podstawowym zagadnieniem optymalizacji jest optymalny wybór parametrów rozdziału, przy zmiennej strukturze; do zadania optymalizacji dodatkowo dochodzi ustalenie optymalnej struktury.

5.2. Optymalizacja statyczna wzbogacania węgla ze stałą strukturą procesu technologicznego

Problemy optymalizacji statycznej formułowane są poprzez model matematyczny procesu, zmienne decyzyjne, ustalone ograniczenia oraz funkcję celu.

Statycznym modelem matematycznym procesów wzbogacania jest układ równań podających zależności pomiędzy natężeniami i zawartością składników strug wyjściowych wzbogacalników od zmiennych decyzyjnych (nastaw) maszyn wzbogacających:

$$x_{Kij} = x_{Nij} \cdot f_{Kij}\,(u_{ij1}, u_{ij2}, \ldots, u_{ij\,L_{ij}}) \tag{5.1}$$

$$w^m_{Kij} = g^m_{Kij}\, f_{Pij}\,(u_{ij1}, u_{ij2}, \ldots, u_{ij\,L_{ij}}) \tag{5.2}$$

$$x_{Pij} = x_{Nij}\, f_{Pij}\,(u_{ij1}, u_{ij2}, \ldots, u_{ij\,L_{ij}}) \tag{5.3}$$

$$w^m_{Pij} = g^m_{Pij}\,(u_{ij1}, u_{ij2}, \ldots, u_{ij\,L_{ij}}) \tag{5.4}$$

$i = 1,2,\ldots,I \qquad j = 1,2,\ldots,J_i, \qquad m = 1,2,\ldots,M$

gdzie:

- x_{Kij} – natężenie strugi koncentratu z j-tego wzbogacalnika pracującego w i-tym systemie technologicznym zakładu,
- x_{Pij} – natężenie strugi półproduktów z j-tego wzbogacalnika pracującego w i-tym systemie technologicznym zakładu,
- x_{Nij} – natężenie strugi nadawy wchodzącej do j-tego wzbogacalnika w i-tym systemie technologicznym,
- w^m_{Kij} – zawartość m-tego składnika strugi o natężeniu x_{Kij},
- w^m_{Pij} – zawartość m-tego składnika strugi o natężeniu x_{Pij},
- I – liczba systemów technologicznych zakładu,
- J_i – liczba wzbogacalników pracujących w i-tym systemie technologicznym,
- M – liczba rozpatrywanych składników,
- L_{ij} – liczba zmiennych sterujących j-tym wzbogacalnikiem i-tego systemu technologicznego,
- u_{ijr} – r-ta zmienna sterująca j-tego wzbogacalnika i-tego systemu technologicznego,
- f_{Kij} – wychód koncentratu z j-tego wzbogacalnika i-tego systemu technologicznego funkcji jego zmiennych sterujących,
- g^m_{Kij} – zawartość m-tego składnika koncentratu z j-tego wzbogacalnika i-tego systemu technologicznego funkcji jego zmiennych sterujących,
- f_{Pij} – wychód półproduktu j-tego wzbogacalnika i-tego systemu technologicznego funkcji jego zmiennych sterujących,
- g^m_{Pij} – zawartość m-tego składnika półproduktu z j-tego wzbogacalnika i-tego systemu technologicznego funkcji jego zmiennych sterujących.

Jeżeli struktura technologiczna zakładu umożliwia mieszanie produktów wzbogacania, to do opisu matematycznego dochodzą dalsze równania:

$$\sum_{i \in \mathcal{I}_r} x_{Ki} - y_{Kr} = 0 \tag{5.5}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}_r} x_{Ki}\, w^m_{Ki} - w^m_{wKi} \sum_{i \in \mathcal{I}_r} x_{Ki} = 0 \tag{5.6}$$

$$\sum_{j \in \mathcal{I}_p} x_{Pi} + y_{P_p} = 0 \tag{5.7}$$

$$\sum_{j \in \mathcal{I}_p} x_{Pi}\, w^m_{Pi} - w^m_{wPi} \sum_{i \in \mathcal{I}_p} x_{Pi} = 0 \tag{5.8}$$

$m = 1,2,\ldots,M, \qquad p = 1,2,\ldots,P, \qquad r = 1,2,\ldots,R$

gdzie:

y_{Kr} - natężenie wypływu r-tej strugi mieszaniny koncentratów,

y_{Pp} - natężenie wypływu p-tej strugi mieszaniny półproduktów,

P - liczba strug mieszanin półproduktów,

R - liczba strug mieszanin koncentratów,

w^m_{wKi} - wypadkowa zawartość m-tego składnika i-tej mieszaniny koncentratów,

w^m_{wPi} - wypadkowa zawartość m-tego składnika i-tej mieszaniny koncentratów,

$\mathfrak{X}_r$ - zbiór koncentratów, z których otrzymano r-tą mieszaninę koncentratu,

$\mathfrak{T}_p$ - zbiór półproduktów, z których otrzymano p-tą mieszaninę półproduktów.

Ograniczenia występujące w tym zagadnieniu mają charakter techniczny, związane są z ograniczonymi wydajnościami maszyn i urządzeń technicznych zakładu. Formalnie można je zapisać w postaci następujących nierówności:

$$0 \leqslant x_{Kij} \leqslant x_{max\ Kij} \tag{5.9}$$

$$0 \leqslant x_{Pij} \leqslant x_{max\ Pij} \tag{5.10}$$

$$i = 1,2,\ldots,I, \qquad j = 1,2,\ldots,l_i \tag{5.11}$$

gdzie:

$x_{max\ Kij}$ - maksymalna dopuszczalna wydajność koncentratu j-tego wzbogacalnika i-tego systemu technologicznego,

$x_{max\ Pij}$ - maksymalna dopuszczalna wydajność półproduktu j-tego wzbogacalnika i-tego systemu technologicznego.

Narzucone są również wymagania dotyczące ilości i jakości produktów końcowych:

$$y_{min\ Ki} \leqslant y_{Ki} \leqslant y_{max\ Ki} \tag{5.12}$$

$$w^m_{min\ Ki} \leqslant w^m_{wKi} \leqslant w^m_{max\ Ki} \tag{5.13}$$

$$y_{min\ Pj} \leqslant y_{Pj} \leqslant y_{max\ Pj} \tag{5.14}$$

$$w^m_{min\ Pj} \leqslant w^m_{w\ Pj} \leqslant w^m_{max\ Pj} \tag{5.15}$$

$$m = 1,2,\ldots,M, \qquad i = 1,2,\ldots,R, \qquad j = 1,2,\ldots,P$$

gdzie:

$y_{max\ Ki}$, $y_{min\ Ki}$ - maksymalna, minimalna wartość natężenia strugi i-tej mieszanki koncentratu wynikająca z planów produkcyjnych,

$y_{max\ Pj}$, $y_{min\ Pj}$ - maksymalna, minimalna wartość natężenia strugi j-tej mieszanki półproduktu wynikająca z planów produkcyjnych.

Funkcję celu przy sterowaniu ze stałą strukturą technologiczną można przyjąć jako wartość produktów końcowych, przypadającą na jednostkę czasu i przedstawić wzorem:

$$I = \sum_{i=1}^{R} y_{Ki}\, c_{Ki} + \sum_{j=1}^{P} y_{Pi}\, c_{Pi} \tag{5.16}$$

gdzie:

c_{Ki}, c_{Pi} - współczynniki wagi.

Współczynniki wagi mogą być funkcją jakości produktów końcowych, np. mogą być ich ceną, wtedy funkcja celu (5.16) wyraża wartość produktów końcowych przypadającą na jednostkę czasu, gdy natomiast są równe jedności, to funkcja ta jest sumarycznym natężeniem wypływu produktów końcowych.

Problem optymalizacji statycznej polega więc na takim wyznaczeniu zmiennych sterujących u, zwanych dalej zmiennymi decyzyjnymi, aby przy spełnieniu równań (5.1) - (5.4), (5.5) - (5.8) i nierówności (5.9) - (5.15) funkcja celu przyjmowała maksymalną wartość. Jest to zagadnienie programowania nieliniowego, co wynika z nieliniowego charakteru statycznego modelu matematycznego procesów wzbogacania węgla. Dla jego rozwiązania można posłużyć się metodami programowania nieliniowego [20].
Wyciągnięcie jednak wniosków ogólnych jest trudne ze względu na nieliniowy charakter zagadnienia. Niektóre aspekty optymalizacji zostaną omówione na podstawie przykładu równolegle pracujących wzbogacalników.

5.2.1. Przykład optymalizacji zespołu równolegle pracujących czterech wzbogacalników

Na rys. 5.2a,b przedstawiono schematy analizowanych układów wzbogacalników. Układ składa się z dwóch systemów technologicznych, na które wchodzi nadawa o natężeniu Q_{N1} i Q_{N2}. Nadawa jest klasyfikowana do dwóch klas ziarnowych: 80-30 i 30-10 mm. Ziarna grube są wzbogacane przez wzbogacalniki o numerach 11 i 21. Są to trójproduktowe separatory z cieczą ciężką, natomiast ziarna drobne wzbogacone są w trójproduktowych osadzarkach - wzbogacalniki o numerach 12 i 22. Na rys. 5.2a przedstawiony jest układ, w którym nie zakłada się mieszania produktów wyjściowych wzbogacalników.

gdzie:

$y_{max\ Ki}$, $y_{min\ Ki}$ - maksymalna, minimalna wartość natężenia strugi i-tej mieszanki koncentratu wynikająca z planów produkcyjnych,

$y_{max\ Pj}$, $y_{min\ Pj}$ - maksymalna, minimalna wartość natężenia strugi j-tej mieszanki półproduktu wynikająca z planów produkcyjnych.

Funkcję celu przy sterowaniu ze stałą strukturą technologiczną można przyjąć jako wartość produktów końcowych, przypadającą na jednostkę czasu i przedstawić wzorem:

$$I = \sum_{i=1}^{R} y_{Ki}\, c_{Ki} + \sum_{j=1}^{P} y_{Pi}\, c_{Pi} \qquad (5.16)$$

gdzie:

c_{Ki}, c_{Pi} - współczynniki wagi.

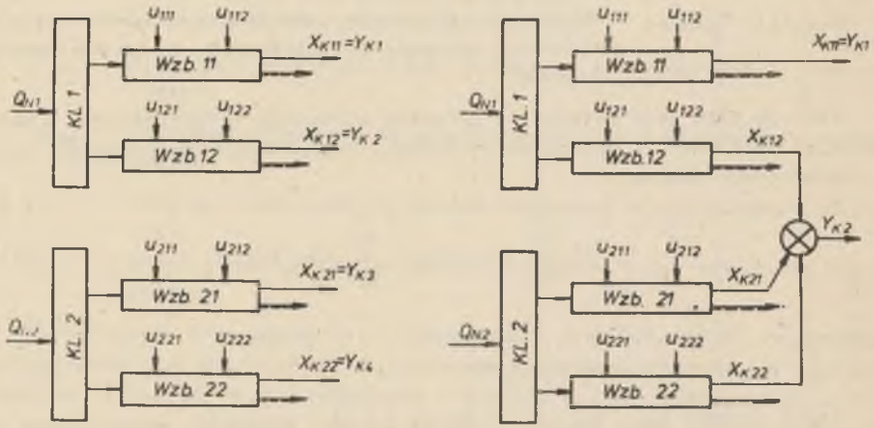
Współczynniki wagi mogą być funkcją jakości produktów końcowych, np. mogą być ich ceną, wtedy funkcja celu (5.16) wyraża wartość produktów końcowych przypadającą na jednostkę czasu, gdy natomiast są równe jedności, to funkcja ta jest sumarycznym natężeniem wypływu produktów końcowych.

Problem optymalizacji statycznej polega więc na takim wyznaczeniu zmiennych sterujących u, zwanych dalej zmiennymi decyzyjnymi, aby przy spełnieniu równań (5.1) - (5.4), (5.5) - (5.8) i nierówności (5.9) - (5.15) funkcja celu przyjmowała maksymalną wartość. Jest to zagadnienie programowania nieliniowego, co wynika z nieliniowego charakteru statycznego modelu matematycznego procesów wzbogacania węgla. Dla jego rozwiązania można posłużyć się metodami programowania nieliniowego [20].
Wyciągnięcie jednak wniosków ogólnych jest trudne ze względu na nieliniowy charakter zagadnienia. Niektóre aspekty optymalizacji zostaną omówione na podstawie przykładu równolegle pracujących wzbogacalników.

5.2.1. Przykład optymalizacji zespołu równolegle pracujących czterech wzbogacalników

Na rys. 5.2a,b przedstawiono schematy analizowanych układów wzbogacalników. Układ składa się z dwóch systemów technologicznych, na które wchodzi nadawa o natężeniu Q_{N1} i Q_{N2}. Nadawa jest klasyfikowana do dwóch klas ziarnowych: 80-30 i 30-10 mm. Ziarna grube są wzbogacane przez wzbogacalniki o numerach 11 i 21. Są to trójproduktowe separatory z cieczą ciężką, natomiast ziarna drobne wzbogacone są w trójproduktowych osadzarkach - wzbogacalniki o numerach 12 i 22. Na rys. 5.2a przedstawiony jest układ, w którym nie zakłada się mieszania produktów wyjściowych wzbogacalników.

Zmiennymi decyzyjnymi w zagadnieniu optymalizacji są ciężary właściwe rozdziału: u_{111}, u_{112}, u_{121}, u_{122}, u_{211}, u_{212}, u_{222}.



Rys. 5.2a,b. Schematy analizowanych układów wzbogacalników

Dla przedstawionego przykładu przyjęto funkcję celu w postaci wyrażenia (5.16), gdzie współczynniki wagi są równe:

$$c_{K1} = c_{K2} = c_{K3} = c_{K4} = 1 \qquad (5.17)$$

$$c_{P1} = c_{P2} = c_{P3} = c_{P4} = 0 \qquad (5.18)$$

Funkcja celu wyraża zatem sumaryczne natężenie wypływu koncentratów:

$$I = y_{K1} + y_{K2} + y_{K3} + y_{K4} \qquad (5.19)$$

Ze względu na tak przyjętą funkcję celu, która nie uwzględnia wychodów półproduktów, założono, że ciężary właściwe rozdziału wzbogacania wtórnego są stałe i równe:

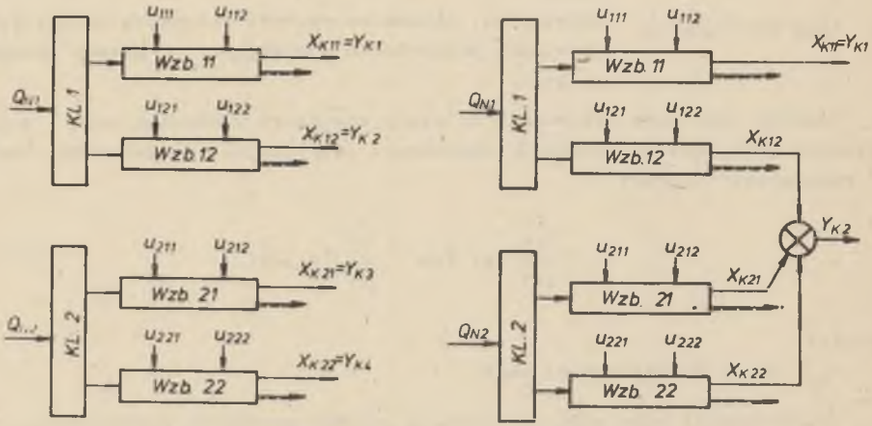
$$u_{112} = u_{122} = u_{212} = u_{222} = 1.9 \cdot 10^3\ \frac{kg}{m^3} \qquad (5.20)$$

Równania statycznego modelu matematycznego dla tak przyjętego układu mają postać:

$$x_{K11} = q_{N1} \cdot a_{11}\, f_{K11}(u_{111}) \qquad (5.21)$$

$$\lambda_{K11} = \varepsilon_{K11}(u_{111}) \qquad (5.22)$$

Zmiennymi decyzyjnymi w zagadnieniu optymalizacji są ciężary właściwe rozdziału: u_{111}, u_{112}, u_{121}, u_{122}, u_{211}, u_{212}, u_{222}.



Rys. 5.2a,b. Schematy analizowanych układów wzbogacalników

Dla przedstawionego przykładu przyjęto funkcję celu w postaci wyrażenia (5.16), gdzie współczynniki wagi są równe:

$$c_{K1} = c_{K2} = c_{K3} = c_{K4} = 1 \tag{5.17}$$

$$c_{P1} = c_{P2} = c_{P3} = c_{P4} = 0 \tag{5.18}$$

Funkcja celu wyraża zatem sumaryczne natężenie wypływu koncentratów:

$$I = y_{K1} + y_{K2} + y_{K3} + y_{K4} \tag{5.19}$$

Ze względu na tak przyjętą funkcję celu, która nie uwzględnia wychodów półproduktów, założono, że ciężary właściwe rozdziału wzbogacania wtórnego są stałe i równe:

$$u_{112} = u_{122} = u_{212} = u_{222} = 1.9.10^3 \ \frac{kg}{m^3} \tag{5.20}$$

Równania statycznego modelu matematycznego dla tak przyjętego układu mają postać:

$$x_{K11} = Q_{N1} \cdot a_{11} f_{K11}(u_{111}) \tag{5.21}$$

$$\lambda_{K11} = \varepsilon_{K11}(u_{111}) \tag{5.22}$$

$$\lambda_{K12} = Q_{N1}(1 - a_{11}) f_{K12}(u_{121}) \tag{5.23}$$

$$\lambda_{K12} = \varepsilon_{K12}(u_{121}) \tag{5.24}$$

$$x_{K21} = Q_{N2} a_{21} f(u_{211}) \tag{5.25}$$

$$\lambda_{K21} = \varepsilon_{K21}(u_{211}) \tag{5.26}$$

$$x_{K22} = Q_{N2}(1-a_{21}) f(u_{221}) \tag{5.27}$$

$$\lambda_{K21} = \varepsilon_{K21}(u_{221}) \tag{5.28}$$

gdzie:

λ_{Kij}, λ_{Pij} - zapopielenie strug koncentratu, zapopielenia o natężeniu x_{Kij}, x_{Pij},

a_{11}, a_{21} - współczynniki zawartości klasy ziarnowej 80-30 mm dla nadawy odpowiednio Q_{N1}, Q_{N2}.

W schemacie technologicznym przedstawionym na rys. 5.1a nie przewiduje mieszania produktów wzbogacania, zatem liczba produktów końcowych jest równa liczbie produktów wzbogacania, a więc równania sprowadzone zostaną do postaci:

$$y_{K1} = x_{K11} \tag{5.29}$$

$$y_{K2} = x_{K12} \tag{5.30}$$

$$y_{K3} = x_{K21} \tag{5.31}$$

$$y_{K4} = x_{K21} \tag{5.32}$$

oraz zawartość składników końcowych jest równa zawartości składników w produktach wzbogacania, co dla zapopielenia można zapisać:

$$\lambda_{wK1} = \lambda_{K11} \tag{5.33}$$

$$\lambda_{wK2} = \lambda_{K12} \tag{5.34}$$

$$\lambda_{wK3} = \lambda_{K21} \tag{5.35}$$

$$\lambda_{wK4} = \lambda_{K22} \tag{5.36}$$

Statyczny model matematyczny układu technologicznego przedstawionego na rys. 5.2b opisują równania (5.21) - (5.28) oraz równania związane z mieszaniem produktów wzbogacania:

$$y_{K1} = x_{K111} \tag{5.37}$$

$$\lambda_{wK1} = \lambda_{K111} \tag{5.38}$$

$$y_{K2} = x_{K12} + x_{K22} + x_{K21} \tag{5.39}$$

$$x_{K12} \cdot \lambda_{K12} + x_{K22} \cdot \lambda_{K22} + x_{K21} \cdot \lambda_{K21} = \lambda_{wK2}(x_{K12}+x_{K22} + x_{K12}) \tag{5.40}$$

Funkcje f_{Ky}, g_{Kij} można wyznaczyć w oparciu o dane analizy densymetrycznej oraz zapopielenia frakcji ciężarowych i modelu symulacyjnego w postaci stabelaryzowanej lub, jak założono dla celów sterowania, za pomocą funkcji (2.1), (2.2). Jako przykład w tablicy 5.1 pokazano stabelaryzowane postacie funkcji (2.1), (2.2) dla dwóch pokładów węgla 355 i 359 KWK Knurów w klasie ziarnowej 80-30 i 30-10 mm.

5.2.2. Optymalizacja przy ograniczeniu związanym z wyprodukowaniem produktów o dopuszczalnym zapopieleniu

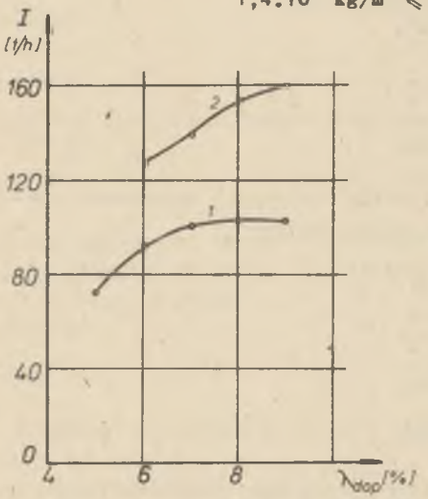
W tablicy 5.2 podano wyniki obliczeń optymalizacji dla nadawy z wybranych pokładów węgla KWK Knurów dla schematu technologicznego przedstawionego na rys. 5.1aib, przy założeniu natężenia strug nadawy Q_{N1}=100 t/godz. Q_{N2} = 100 przy następujących ograniczeniach:

$$1{,}4.10^3 \text{ kg/m}^3 \leqslant u_{111} \leqslant 1{,}84 \text{ kg/m}^3 \tag{5.41}$$

$$1{,}4.10^3 \text{ kg/m}^3 \leqslant u_{121} \leqslant 1{,}84 \text{ kg/m}^3 \tag{5.42}$$

$$1{,}4.10^3 \text{ kg/m}^3 \leqslant u_{211} \leqslant 1{,}84.10^3 \text{ kg/m}^3 \tag{5.43}$$

$$1{,}4.10^3 \text{ kg/m}^3 \leqslant u_{221} \leqslant 1{,}84.10^3 \text{ kg/m}^3 \tag{5.44}$$



Ryś. 5.3. Zależność sumarycznego wychodu koncentratu funkcji dopuszczalnej wartości zapopielenia dla układów z rys. 5.2a,b

Jak widać, optymalne wartości zmiennych decyzyjnych są zależne od schematu technologicznego i od nadawy.

Na rys. 5.3 pokazano zależności sumarycznego wychodu koncentratu funkcji dopuszczalnej wartości zapopielenia. Korzystniejszym schematem technologicznym, w którym uzyskuje się większy wychód koncentratu, jest układ technologiczny pokazany na rys. 5.1b, jednak nie można w tym przypadku uzyskać koncentratu o dopuszczalnym zapopieleniu poniżej 5%.

Tablica 5.1

Stabelaryzowana postać funkcji (2.1, 2.2) dla nadawy z dwóch pokładów węgla 355 i 359

u 10^3kg/m^3	355				359			
	$f_{K11}(u)$	$g_{K11}(u)$	$f_{K12}(u)$	$g_{K12}(u)$	$f_{K21}(u)$	$g_{K21}(u)$	$f_{K22}(u)$	$g_{K22}(u)$
1.4	0.3479	0.0599	0.5192	0.0857	0.3519	0.032	0.5794	0.04684
1.42	0.3769	0.0623	0.5483	0.0861	0.3724	0.0324	0.6101	0.04709
1.44	0.4003	0.0645	0.5767	0.0866	0.3916	0.03308	0.6401	0.0473
1.46	0.4195	0.0648	0.6046	0.0807	0.4093	0.03517	0.6696	0.0477
1.48	0.4439	0.0667	0.6321	0.0875	0.4281	0.0386	0.6987	0.04808
1.5	0.5042	0.0639	0.6594	0.088	0.4948	0.034	0.7278	0.04847
1.52	0.5389	0.0684	0.6868	0.0886	0.5249	0.0357	0.757	0.04887
1.54	0.5441	0.0694	0.713	0.0893	0.5263	0.03607	0.7846	0.0493
1.56	0.5491	0.0704	0.7338	0.0905	0.5276	0.0364	0.804	0.05024
1.58	0.5669	0.0728	0.751	0.0915	0.5315	0.037	0.8198	0.0512
1.6	0.571	0.0742	0.7658	0.0934	0.5335	0.03789	0.8328	0.0523
1.62	0.5758	0.0762	0.7789	0.0951	0.5384	0.0411	0.8439	0.0535
1.64	0.5852	0.0782	0.79	0.097	0.5411	0.0419	0.8581	0.0548
1.66	0.5862	0.0785	0.7995	0.0989	0.5418	0.04228	0.8608	0.0561
1.68	0.5892	0.0795	0.808	0.101	0.5431	0.04284	0.8674	0.0576
1.7	0.5906	0.0801	0.8152	0.1032	0.5449	0.04407	0.8728	0.0591
1.72	0.5947	0.0825	0.8215	0.1054	0.553	0.05049	0.8775	0.0606
1.74	0.5955	0.0829	0.8272	0.1078	0.5541	0.0512	0.8816	0.0623
1.76	0.5964	0.0833	0.8326	0.1102	0.5552	0.0519	0.8857	0.064
1.78	0.5996	0.0847	0.8372	0.1127	0.5578	0.03335	0.8889	0.0658
1.8	0.6011	0.0855	0.8419	0.1155	0.581	0.0557	0.8922	0.0677
1.82	0.6015	0.0858	0.847	0.1188	0.5618	0.05636	0.8958	0.07
1.84	0.602	0.086	0.8526	0.1227	0.5626	0.05699	0.8997	0.0727

Tablica 5.2

Wyniki obliczeń optymalizacyjnych dla nadawy z wybranych pokładów węgla KWK Knurów

Numer pokładów nadawy	Układ techn. rys.	Zmienne decyzje * * $\cdot 10^3$ kg/m^3				Natężenie strug produktów końcowych t/godz.				Zapopielenie produktów końcowych %				Całkow. wychód koncentratu
		u_{111}	u_{121}	u_{211}	u_{221}	y_1	y_2	y_3	y_4	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	
355 1 359	5.2a	1.82	1.54	1.82	1.82	13.45	68.13	21.01	46.39	5.64	7	8.58	8.93	0.7449
	5.2b	1.82	1.4 *	1.82	1.4 *	21.01	136.69	-	-	8.38	8.83	-	-	0.7885
355 1 361	5.2a	1.82	1.62	1.82	1.82	13.45	68.13	19.25	62.64	5.64	7	8.71	8.99	0.8174
	5.2b	1.82	1.4 *	1.82	1.4 *	150.44	19.25	-	-	8.52	8.71	-	-	0.8485
359 1 404/2	5.2a	1.6	1.4 *	1.82	1.54	21.01	46.39	11.31	-	8.58	8.93	8.94	-	0.3936
	5.2b	1.6	1.44	1.58	1.46	11.318	88.108	-	-	8.94	8.98	-	-	0.4971
404/2 1 406/3	5.2a	1.6	1.4 **	1.68	1.4 **	10.089	11.31	-	-	8.48	8.94	-	-	0.107
	5.2b	1.6	1.4 **	1.4 **	1.4 **	11.31	-	-	-	8.94	-	-	-	0.056

* * - zmienne podano w jednostkach gęstości

* - zapopielenie strug produktów dla tych wartości zmiennych decyzyjnych są już większe od λ_{dop}

5.3. Optymalizacja statyczna przy możliwości zmiany struktury mieszania produktów wzbogacania

Jak można było zauważyć z poprzednich rozważań, wychody koncentratów przy schematach technologicznych pokazanych na rys. 5.1aib są różne i układ o schemacie technologicznym pokazanym na rys. 5.2b charakteryzuje się zazwyczaj większym sumarycznym wychodem koncentratu przy tym samym założonym dopuszczalnym zapopieleniu produktów końcowych. Można jeszcze utworzyć inne struktury mieszania produktów wzbogacania i dla każdego układu technologicznego wyznaczyć optymalne wartości zmiennych decyzyjnych. Sposób mieszania produktów wzbogacania, charakteryzujący się największą wartością kryterium optymalizacji, będzie się nazywać optymalną strukturą mieszania produktów wzbogacania. Niektóre problemy dotyczące wyboru optymalnego sposobu mieszania zostaną omówione w dalszych punktach pracy.

5.3.1. Zapis struktury mieszania produktów wzbogacania

Niech liczba strug produktów wzbogacania wynosi $N(x_1,x_2,\ldots,x_N)$, maksymalna liczba strug produktów końcowych będzie równa liczbie produktów wzbogacania $N(y_1,y_2,\ldots,y_N)$. Należy zaznaczyć, że struga produktu wzbogacania wchodzi w skład tylko jednej mieszanki. Strukturę mieszania można zapisać za pomocą macierzy o elementach zero-jedynkowych.

Tworzy się macierz (d_{ij}), której wiersze dotyczą kolejnych numerów produktów końcowych y_i, a numery kolumn dotyczą numerów produktów wzbogacania x_j, przy czym:

$$d_{ij}\begin{cases}1 - \text{gdy do i-tego produktu końcowego wchodzi struga j-tego produktu wzbogacania,}\\ 0 - \text{gdy do i-tego produktu końcowego nie wchodzi j-ta struga produktu wzbogacania.}\end{cases} \qquad (5.45)$$

I tak np. dla schematu technologicznego (rys. 5.1a) struktury tworzenia produktów końcowych (koncentratów) można zapisać za pomocą następującej macierzy:

$$\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

co oznacza produkowanie 4 produktów końcowych (oztery wiersze);każdy produkt składa się z jednego produktu wzbogacania (w każdym wierszu mamy tyl-

ko jedną jedynkę). Dla schematu technologicznego (rys. 5.1b) macierz tworzenia produktów końcowych ma postać:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

co oznacza produktowanie dwóch produktów końcowych (dwa wiersze). Produkt nr 1 składa się z jednego produktu końcowego oznaczonego numerem 1, drugi natomiast produkt końcowy powstaje przez zmieszanie trzech produktów wzbogacania o numerach 2,3,4. Przyjęcie takiego sposobu zapisu struktury mieszania produktów wzbogacania umożliwia proste generowanie struktur mieszania za pomocą maszyny cyfrowej.

5.3.2. Liczba możliwych sposobów mieszania strug produktów wzbogacania

W celu rozpatrzenia wielkości i złożoności zagadnienia wyboru optymalnej struktury mieszania produktów wzbogacania wyprowadzono wzór na liczbę L_p możliwych sposobów mieszania N strug produktów wzbogacania. Zgodnie z [20] liczba ta może być wyznaczona w oparciu o następujący wzór rekurencyjny:

$$L_p(N) = 1 + \binom{N-1}{1} L_p(1) + \binom{N-1}{2} L_p(2) + \ldots + \binom{N-1}{N-1} L_p(N-1) \quad (5.46)$$

Ilość możliwych sposobów mieszania produktów wzbogacania przy N>5 jest bardzo duża (tablica 5.3), co może stworzyć poważny problem przy opracowywaniu algorytmu optymalizacji struktury.

Tablica 5.3

Stabelaryzowana postać funkcji (5.46)

Liczba strug produktów wzbogacania N	Liczba możliwych sposobów mieszania Lp(N)
2	2
3	5
4	15
5	46
6	197
7	565
8	3590

5.3.3. Optymalizacja przy ograniczeniu związanym z wyprodukowaniem produktu o dopuszczalnym zapopieleniu z uwzględnieniem możliwości zmiany struktury mieszania koncentratów

Wykonano obliczenia optymalizacyjne z uwzględnieniem wszystkich możliwych sposobów mieszania (tablica 5.3) produktów wyjściowych (koncentratów). Otrzymane wyniki obliczeń przedstawiono w tablicy 5.4. Jak widać, w zbiorze różnych sposobów mieszania istnieją takie, dla których wychód koncentratu jest największy. Optymalny sposób mieszania zależy od rodzaju nadawy, natomiast nastawy maszyn z kolei zależą od sposobu mieszania.

Zwiększenie optymalnego wychodu koncentratu w odniesieniu do wychodu, kiedy produkty wzbogacania nie są mieszane, jest dosyć znaczne, dla nadawy z pokładów 355 i 361 wynosi około 4%, z 404/2 i 359 wynosi 24%, z 404/2 i 406/3 wynosi 26%.

W tablicy 5.5 przedstawiono wyniki obliczeń dla nadawy z pokładów 355 i 359 dla różnych wartości dopuszczalnego zapopielenia produktu końcowego. Można tu zauważyć, że optymalna struktura mieszania nie zależy od dopuszczalnego zapopielenia produktu końcowego i wyraża mieszanie wszystkich produktów wzbogacania do produktu końcowego. Jednak dla wartości λ_{dop} mniejszych od pewnych wartości następuje zmiana optymalnego sposobu mieszania, np. dla $\lambda_{dop} = 0.05$ optymalna struktura mieszania ma numer 8, a nie jak w przypadku $\lambda_{dop} > 5\%$ numer 15.

5.3.4. Optymalizacja przy ograniczeniach związanych z wyprodukowaniem produktów o określonych dwóch dopuszczalnych zapopieleniach z możliwością zmian sposobu mieszania produktów wzbogacania

Podobnie jak w punkcie poprzednim wykonano obliczenia optymalizacyjne dla różnych sposobów mieszania przy założeniu wyprodukowania produktów o dwóch wartościach dopuszczalnego zapopielenia λ_{dop1}, λ_{dop2}. Nie narzucono tu jednak warunków dotyczących natężenia strug produktów końcowych. Otrzymane wyniki przedstawiono w tablicy 5.6. Optymalne sposoby mieszania różnią się od optymalnych sposobów przy założeniach przyjętych w poprzednim punkcie.

Optymalizacja przy ograniczeniach związanych z wyprodukowaniem produktów o dwóch lub więcej dopuszczalnych zapopieleniach jest zagadnieniem bardziej złożonym z punktu widzenia algorytmu optymalizacji, bowiem w obszarze dopuszczalnych zmiennych decyzyjnych występują maksyma lokalne. Można jednak korzystać z zasady, że optymalne warunki wzbogacania (w przypadku stosowania kryterium (5.19)) występują wtedy, gdy struga produktu końcowego o najmniejszym zapopieleniu posiada najmniejsze natężenie. Strugi o

Tablica 5.4

Niektóre wyniki obliczeń optymalizacyjnych dla nadawy z wybranych pokładów KWK Knurów
z uwzględnieniem wszystkich możliwych sposobów mieszania koncentratów

	Rodzaje nadawy / Zapis struktury mieszania	355 i 361					404/2 i 355					404/2 i 359					404/2 i 406/3					355 i 359				
		nastawy maszyn xx				Sumar. wychód koncentr.	nastawy maszyn x				Sumar. wychód koncentr.	nastawy maszyn xx				Sumar. wychód koncentr.	nastawy maszyn xx				Sumar. wychód koncentr.	nastawy maszyn x				Sumar. wychód koncentr.
		u_{111}	u_{121}	u_{211}	u_{221}		u_{111}	u_{121}	u_{211}	u_{221}		u_{111}	u_{121}	u_{211}	u_{221}		u_{111}	u_{121}	u_{211}	u_{221}		u_{111}	u_{121}	u_{211}	u_{221}	
1	1000 0100 0010 0001	1.82	1.62	1.82	1.82	0.8174	1.82	1.62	1.6	1.4*	0.4661	1.6	1.4*	1.82	1.54	0.3936	1.6	1.4*	1.68	1.4*	0.107	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449
2	1000 0100 0011	1.82	1.62	1.82	1.82	0.8174	1.82	1.62	1.4*	1.4*	0.4095	1.6	1.4*	1.82	1.58	0.4060	1.6	1.4*	1.4	1.4*	0.0566	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449
3	1000 0101 0010	1.82	1.82	1.82	1.82	0.8485	1.82	1.4*	1.6	1.4*	0.1529	1.6	1.4*	1.82	1.4	0.1616	1.6	1.4*	1.68	1.4*	0.1070	1.82	1.78	1.82	1.82	0.7854
4	1000 0110 0001	1.82	1.7	1.82	1.82	0.8342	1.82	1.62	1.6	1.4*	0.4661	1.6	1.4*	1.4	1.54	0.2886	1.6	1.4*	1.4	1.4*	0.0566	1.82	1.64	1.82	1.82	0.77
5	1000 0111	1.82	1.82	1.82	1.82	0.8485	1.82	1.42	1.56	1.4*	0.4976	1.6	1.46	1.58	1.46	0.4971	1.6	1.4*	1.4*	1.4*	0.0566	1.82	1.82	1.82	1.82	0.7885
6	1001 0100 0010	1.82	1.62	1.82	1.82	0.8174	1.4*	1.62	1.82	1.4*	0.3698	1.7	1.4*	1.82	1.46	0.365	1.4*	1.4*	1.68	1.4*	0.0504	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449
7	1001 0110	1.82	1.7	1.82	1.82	0.8342	1.4*	1.62	1.6	1.4*	0.9698	1.7	1.4*	1.4	1.46	0.2599	1.4*	1.4*	1.4*	1.4*	0.0	1.82	1.64	1.82	1.82	0.77
8	1010 0100 0001	1.82	1.62	1.82	1.82	0.8174	1.82	1.62	1.6	1.4*	0.4661	1.7	1.4*	1.68	1.54	0.3938	1.62	1.4*	1.42	1.4*	0.0884	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449
9	1010 0101	1.82	1.82	1.82	1.82	0.8485	1.82	1.4	1.6	1.4*	0.1529	1.7	1.4*	1.62	1.4	0.1638	1.62	1.4*	1.42	1.4*	0.0884	1.82	1.8	1.82	1.82	0.7854
10	1011 0100	1.82	1.62	1.82	1.82	0.8174	1.54	1.62	1.42	1.4*	0.5624	1.82	1.4*	1.66	1.46	0.3677	1.4*	1.4*	1.4*	1.4*	0.0	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449
11	1100 0010 0001	1.82	1.62	1.82	1.82	0.8174	1.82	1.62	1.6	1.4*	0.4661	1.4*	1.4*	1.82	1.54	0.337	1.4*	1.4*	1.68	1.4*	0.0504	1.82	1.58	1.82	1.82	0.7569
12	1100 0011	1.82	1.62	1.82	1.82	0.8174	1.82	1.62	1.4*	1.4*	0.4095	1.4*	1.4*	1.82	1.58	0.3494	1.4*	1.4*	1.4*	1.4*	0.0000	1.82	1.58	1.82	1.82	0.7573
13	1101 0010	1.82	1.82	1.82	1.82	0.8485	1.6	1.56	1.6	1.4*	0.569	1.4*	1.4*	1.82	1.4	0.1051	1.4*	1.4*	1.62	1.4*	0.0504	1.82	1.8	1.82	1.82	0.7869
14	1110 0001	1.82	1.76	1.82	1.82	0.8344	1.82	1.62	1.6	1.4	0.4661	1.42	1.4*	1.52	1.54	0.49	1.4*	1.4*	1.4*	1.4*	0.0	1.82	1.7	1.82	1.82	0.7737
15	1111	1.82	1.82	1.82	1.82	0.8485	1.6	1.56	1.6	1.42	0.5764	1.4*	1.4*	1.52	1.54	0.4952	1.4*	1.4*	1.4*	1.4*	0.0	1.82	1.82	1.82	1.82	0.7885

xx zmienne podano w jednostkach gęstości 10^3 kg/m^3

x zapopielenia strug produktów dla tych wartości zmiennych decyzyjnych są już większe od λ_{dop}

Tablica 5.5

Wyniki niektórych obliczeń optymalizacyjnych dla nadawy z pokładu 355 i 359 KWK Knurów
dla różnych wartości dopuszczalnego zapopielenia λ_{dop} z uwzględnieniem wszystkich sposobów mieszania

	λ_{dop} % / Zapis struktury mieszania	9					8					7					6					5				
		Nastawy maszyn aa				Sumar. wychód koncentr.	Nastawy maszyn aa				Sumar. wychód koncentr.	Nastawy maszyn aa				Sumar. wychód koncentr.	Nastawy maszyn aa				Sumar. wychód koncentr.	Nastawy maszyn aa				Sumar. wychód koncentr.
		u_{111}	u_{121}	u_{211}	u_{221}		u_{111}	u_{121}	u_{211}	u_{221}		u_{111}	u_{121}	u_{211}	u_{221}		u_{111}	u_{121}	u_{211}	u_{221}		u_{111}	u_{121}	u_{211}	u_{221}	
1	1000 0100 0010 0001	1,82	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.68	1.4a	1.82	1.82	0,5108	1.54 1.4a	1.4a 1.82	1.82	1.82	0.5016	1.4a	1.4a	1.82	1.7	0,4599	1.4a	1.4a	1.78	1.54	0.1652
2	1000 0100 0011	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.68	1.4a	1.82	1.82	0.5108	1.54	1.4a	1.82	1.82	0.5029	1.4a	1.4a	1.82	1.72	0.4612	1.4a	1.4a	1.78	1.6	0.1835
3	1000 0101 0010	1,82	1.78	1.82	1.82	0.7854	1.68	1.6	1.82	1.82	0.7600	1.54	1.46	1.82	1.74	0.6943	1.4a	1.4a	1.82	1.4a	0.1280	1.4a	1.4a	1.78	1.4a	0.0668
4	1000 0110 0001	1.82	1.64	1.82	1.82	0.7700	1.68	1.48	1.82	1.82	0.7165	1.54	1.4a	1.4a	1.8	0.4343	1.4a	1.4a	1.4a	1.7	0.3927	1.4a	1.4a	1.4a	1.54	0.2984
5	1000 0111	1.82	1.82	1.82	1.82	0.7885	1.68	1.66	1.82	1.82	0.77	1.54	1.46	1.78	1.82	0.6992	1.4a	1.46	1.78	1.6	0.6409	1.4a	1.4a	1.4a	1.4a	0.0.000
6	1001 0100 0010	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.82	1.4a	1.82	1.82	0.513	1.54	1.4a	1.82	1.82	0.5029	1.76	1.4a	1.82	1.6	0.4881	1.4a	1.4a	1.78	1.44	0.1710
7	1001 0110	1.82	1.54	1.82	1.82	0.77	1.82	1.48	1.82	1.82	0.718	1.54	1.4a	1.4a	1.82	0.4357	1.76	1.4a	1.4a	1.6	0.4209	1.4a	1.4a	1.4a	1.44	0.1042
8	1010 0100 0001	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.82	1.4a	1.82	1.82	0.513	1.82	1.4a	1.78	1.8	0.5111	1.62	1.4a	1.78	1.78	0.4993	1.46	1.4a	1.78	1.54	0.4384
9	1010 0101	1.82	1.8	1.82	1.82	0.7854	1.82	1.6	1.82	1.82	0.7621	1.82	1.42	1.58	1.74	0.7038	1.62	1.4a	1.78	1.4a	0.1673	1.46	1.4a	1.78	1.4a	0.1400
10	1011 0100	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.82	1.4a	1.82	1.82	0.513	1.82	1.4a	1.82	1.8	0.5116	1.78	1.4a	1.82	1.58	0.4841	1.52	1.4a	1.78	1.44	0.4043
11	1100 0010 0001	1.82	1.58	1.82	1.82	0.7569	1.66	1.46	1.82	1.82	0.707	1.4a	1.4a	1.82	1.8	0.4066	1.4a	1.4a	1.82	1.7	0.3992	1.4a	1.4a	1.78	1.54	0.1652
12	1100 0011	1.82	1.58	1.82	1.82	0.7573	1.66	1.46	1.82	1.82	0.707	1.4a	1.4a	1.82	1.82	0.4079	1.4a	1.4a	1.82	1.72	0.4010	1.4a	1.4a	1.78	1.6	0.1835
13	1101 0010	1.82	1.8	1.82	1.82	0.7869	1.82	1.56	1.82	1.82	0.7516	1.52	1.46	1.82	1.76	0.6949	1.4a	1.4a	1.82	1.4a	0.0672	1.4a	1.4a	1.78	1.4a	0.0668
14	1110 0001	1.82	1.7	1.82	1.82	0.7737	1.56	1.56	1.82	1.82	0.742	1.58	1.46	1.78	1.8	0.7018	1.4a	1.4a	1.4a	1.4a	0.3319	1.4a	1.4a	1.4a	1.54	0.1652
15	1111	1.82	1.82	1.82	1.82	0.7885	1.82	1.64	1.82	1.82	0.77	1.7	1.46	1.78	1.8	0.7059	1.4a	1.46	1.78	1.6	0.6409	1.4a	1.4a	1.4a	1.4a	0.0

xx zmienne podano w jednostkach gęstości $10^3 \cdot \frac{kg}{m^3}$

a zapopielenia strug produktów dla tych wartości zmiennych decyzyjnych są już większe od λ_{dop}.

Tablica 5.6

Wyniki niektórych obliczeń optymalizacyjnych dla nadawy z pokładów 355 i 359 KWK Knurów przy założeniu produkcji dwóch produktów o dopuszczalnym zapopielaniu λ_{dop1} = 9% i różnych wartościach λ_{dop2}

Lp.	λ_{dop2} % / Zapis struktury mieszania	7					8					9				
		Nastawy maszyn x				Sumar. wychód koncentr.	Nastawy maszyn x				Sumar. wychód koncentr.	Nastawy maszyn x				Sumar wychód koncentr.
1	1000 0100 0010 0001	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.82	1.54	1.82	1.81	.7449	1.82	1.54	1.82	1.54	0.7027
2	1000 0100 0011	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.82	1.54	1.82	1.82	.7449	1.82	1.54	1.78	1.6	0.7205
3	1000 0101 0010	1.82	1.78	1.82	1.82	0.7854	1.82	1.78	1.82	1.82	.7854	1.82	1.82	1.78	1.78	0.7854
4	1000 0110 0001	1.82	1.64	1.82	1.82	0.77	1.4	1.64	1.82	1.82	.7257	1.82	1.7	1.78	1.54	0.7354
5	1000 0111	1.54	1.82	1.82	1.82	0.7785	1.4	1.82	1.82	1.82	.7443	-	-	-	-	0.000
6	1001 0100 0010	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.82	1.54	1.82	1.82	.7449	1.82	1.54	1.78	1.82	0.7445
7	1001 0110	1.54	1.64	1.82	1.82	0.76	1.42	1.7	1.78	1.7	.7297	1.4	1.7	1.78	1.44	0.6362
8	1010 0100 0001	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.82	1.54	1.82	1.7	.7362	1.82	1.54	1.82	1.54	0.7027
9	1010 0101	1.66	1.78	1.82	1.82	0.7827	1.42	1.82	1.82	1.78	.7467	1.46	1.78	1.78	1.82	0.7531
10	1011 0100	1.66	1.54	1.82	1.82	0.7423	1.5	1.54	1.78	1.76	.7236	1.4	1.54	1.78	1.58	0.6713
11	1100 0010 0001	1.82	1.58	1.82	1.82	0.7573	1.82	1.58	1.82	1.82	.7373	1.82	1.58	1.78	1.82	0.7568
12	1100 0011	1.82	1.58	1.82	1.82	0.7573	1.82	1.58	1.78	1.76	.7530	1.82	1.58	1.78	1.6	0.7329
13	1101 0010	1.82	1.58	1.82	1.82	0.7573	1.82	1.58	1.78	1.76	.7872	1.82	1.82	1.78	1.8	0.7867
14	1110 0001	1.62	1.7	1.82	1.82	0.7737	1.82	1.66	1.82	1.7	.7643	1.82	1.66	1.82	1.54	0.7308
15	1111	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

x umowne podanowy jednostkach gęstości . $10^3 \cdot \frac{kg}{m^3}$

Tablica 5.7

Wyniki niektórych obliczeń optymalizacyjnych dla nadawy z pokładu 355 i 359 KWK Knurów przy założeniu dwóch produktów o λ_{dop1} = 8%, λ_{dop2} = 6% dla natężenia strug Q_{N1} = 100 i różnych wartości Q_{N2}

Lp.	Q_{N2} t/godz. / Zapis struktury mieszania	80					100					120				
		n_{111}	n_{121}	n_{211}	n_{221}	Sumar. wychód koncentr.	n_{111}	n_{121}	n_{211}	n_{221}	Sumar. wychód koncentr.	n_{111}	n_{121}	n_{211}	n_{221}	Sumar. wychód koncentr.
1	1000 0100 0010 0001	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7528	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7385
2	1000 0100 0011	1.4	1.54	1.82	1.82	0.7135	1.4	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.4	1.54	1.82	1.82	0.5908
3	1000 0101 0010	1.82	1.82	1.82	1.82	0.7916	1.82	1.72	1.82	1.82	0.7854	1.82	1.76	1.82	1.82	0.781
4	1000 0110 0001	1.4	1.66	1.82	1.82	0.7385	1.4	1.64	1.82	1.82	0.7257	1.4	1.64	1.82	1.82	0.7175
5	1000 0111	1.4	1.82	1.82	1.82	0.7528	1.4	1.82	1.82	1.82	0.7443	1.4	1.8	1.82	1.82	0.7359
6	1001 0100 0010	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7528	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7449	1.82	1.54	1.82	1.82	0.7385
7	1001 0110	1.5	1.72	1.78	1.7	0.7588	1.42	1.7	1.78	1.7	0.7297	1.42	1.64	1.82	1.7	0.7158
8	1010 0100 0001	1.82	1.54	1.82	1.7	0.7431	1.82	1.54	1.82	1.7	0.7362	1.82	1.54	1.82	1.7	0.7296
9	1010 0101	1.42	1.82	1.82	1.82	0.7567	1.42	1.82	1.82	1.78	0.7467	1.42	1.82	1.82	1.72	0.7369
10	1011 0100	1.5	1.54	1.78	1.76	0.7329	1.5	1.54	1.78	1.76	0.7236	1.4	1.54	1.82	1.72	0.6939
11	1100 0010 0001	1.82	1.58	1.82	1.82	0.7638	1.82	1.58	1.82	1.82	0.7573	1.82	1.58	1.82	1.82	0.7508
12	1100 0011	1.82	1.58	1.78	1.76	0.759	1.82	1.58	1.78	1.76	0.753	1.82	1.58	1.78	1.76	0.7488
13	1101 0010	1.82	1.82	1.82	1.82	0.7916	1.82	1.82	1.82	1.8	0.7872	1.82	1.8	1.82	1.78	0.7815
14	1110 0001	1.82	1.68	1.82	1.7	0.7706	1.82	1.66	1.82	1.7	0.7643	1.82	1.66	1.82	1.7	0.7611
15	1111	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

x umowne podano w jednostkach gęstości . $10^3 \cdot \frac{kg}{m^3}$

dużym natężeniu przeznaczone są do produktów o większym zapopieleniu. Również i tu można stwierdzić znaczne zwiększenie się sumaryocznego wychodu koncentratu w odniesieniu do przypadku, kiedy nie miesza się produktów wzbogacania.

5.3.5. W p ł y w z m i a n n a t ę ż e n i a s t r u g i n a d a w y n a o p t y m a l n e w a r u n k i w z b o g a c a n i a

W celu zbadania wpływu zmian natężenia strugi nadawy Q_{N1} Q_{N2} na optymalne warunki wzbogacania wykonano obliczenia optymalizacyjne z uwzględnieniem wszystkich sposobów mieszania nadawy z pokładu 355 i 359 KWK Knurów przy stałej wartości Q_{N1} i różnych wartościach Q_{N2}. Wyniki obliczeń przedstawiono w tablicy 5.7. Można stwierdzić, że optymalna struktura mieszania przy zmianach Q_{N2} jest niezmienna. Zmieniają się jednak dla tej struktury optymalne nastawy maszyn i maksymalny całkowity wychód koncentratu.

5.4. Uwagi i wnioski

Jednym z najważniejszych zadań systemu sterowania procesami wzbogacania jest ich optymalizacja statyczna. Optymalizacja statyczna pozwala dopiero na określenie optymalnych nastaw maszyn wzbogacających, w oparciu o zadania planowe, charakterystyki wzbogacalników i przyjęty cel (funkcję celu).

Jednym z problemów jest więc dobór funkcji celu. Kryteria stosowane do określenia optymalnych warunków wzbogacania można podzielić na trzy grupy [38]:

- kryteria uwzględniające koszty produkcji, należą tutaj kryteria podane przez: Niemirowskiego, Burszteina - Gajdarenki, Bielikowa,
- kryteria uwzględniające zysk przypadający na jedną tonę nadawy; wymienia się tutaj kryteria Stępińskiego, Blaschkego, Persina-Gizutermana i Bakelsa,
- kryteria uwzględniające wskaźniki techniczno-ekonomiczne; należą tutaj kryteria Fomienki i Matuszenki.

Postacie funkcyjne wymienionych kryteriów nie nadają się jednak do celów optymalnego sterowania procesami wzbogacania węgla. Wynika to przede wszystkim z faktu, że brak jest bieżącej informacji o wartościach zmiennych wchodzących w postać funkcyjną kryterium niezbędnych dla bieżącego doboru zmiennych decyzyjnych.

Kryterium sterowania powinno charakteryzować się następującymi cechami:

- argumenty funkcji kryterium powinny być łatwo wyznaczalne drogą pomiaru lub obliczeń,
- postać funkcyjna winna być elastyczna i uniwersalna.

Przez dobór odpowiednich stałych powinna istnieć możliwość manewrów dla uwzględnienia rzeczywistych warunków techniczno-ekonomicznych. Kryterium, które posiada w pewnym stopniu powyższe cechy, można przedstawić za pomocą wzoru (5.16). Uniwersalność tego kryterium wyraża się tym, że ma ono charakter ekonomiczny, gdy współczynniki wagi będą wyrażały cechy produktów końcowych. Przedstawia ono zatem wartość produktów końcowych, a ze względu na fakt, że koszty produkcji w danym zakładzie nie zależą w sposób istotny od zmiennych decyzyjnych, zmiany wartości produkcji są w przybliżeniu równe zmianom zysku. Elastyczność kryterium polega na tym, że w zależności od współczynników wag można uzyskać różne efekty ekonomiczno-techniczne produkcji zakładu. I tak, np. przy przyjęciu współczynników wag różnych jedności kryterium wyraża maksymalizację sumaryocznego wychodu produktów wzbogacania.

W przedstawionych przykładach tego rozdziału analizę przeprowadzono przyjmując jako funkcję celu sterowania maksymalizację sumaryocznego wychodu koncentratu. Przyjęcie takiego kryterium znacznie uprościło obliczenia optymalizacyjne, ponieważ ograniczono się do wyznaczenia zmiennych decyzyjnych mających decydujący wpływ na wychód i zapopielenie koncentratu. Dla trójproduktowego separatora z cieczą ciężką, jako zmienną decyzyjną, przyjęto ciężar właściwy cieczy wzbogacania wstępnego, a w przypadku osadzarek ciężar właściwy rozdziału wzbogacania wtórnego.

Z przedstawionych przykładów optymalizacji czterech wzbogacalników widać, że istotny jest problem doboru sposobu mieszania produktów wzbogacania. Dzięki mieszaniu można uzyskać czasem znaczne zwiększenie sumaryocznego wychodu produktów końcowych w odniesieniu do takiego procesu, gdzie punkty wzbogacania nie zostają mieszane. Przy założeniu niemieszania optymalne nastawy maszyn dobiera się w ten sposób, aby produkty wzbogacania miały zapopielenie równe zapopieleniu dopuszczalnemu. Przy pracy równoległej maszyn niesłuszny jest więc pogląd, że dla uzyskania maksymalnego wychodu produktów wystarczy dobrać nastawy każdej maszyny tak, aby zapopielenie produktu było równe dopuszczalnemu. Zagadnienie bardziej komplikuje się, gdy wymagana jest równoległa produkcja wielu produktów o różnych zapopieleniach (jakościach). I tu wybór optymalnego sposobu mieszania jest bardzo istotny.

Zmiany natężenia strugi nadawy wchodzące do systemu technologicznego zakładu w przedstawionym przykładzie nie mają zasadniczo wpływu na optymalny sposób mieszania, jednak optymalne nastawy ulegają zmianie. Konieczna staje się więc ich kontrola lub stabilizacja.

Jednym z najważniejszych zagadnień staje się opracowanie algorytmu optymalizacji.

6. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI OGÓLNE

W pracy podjęto problemy związane ze sterowaniem procesami wzbogacania węgla. Ze względu na bardzo złożony i rozległy ich charakter ograniczono się do badania podstawowych zagadnień przedstawionych w celach i tezach pracy. Zagadnienia te dotyczyły:

- opracowania statycznych modeli wzbogacalników cieczy ciężkiej i osadzarki,
- ustalenia parametrów czujników pomiarowych i algorytmu identyfikacji procesów tych maszyn wzbogacających,
- sformułowania celu optymalizacji statycznej i sposobu optymalnego mieszania produktów wzbogacania.

Jako model statyczny wzbogacalnika z cieczą ciężką przyjęto zależność wychodu koncentratu i jego zapopielenia w funkcji gęstości cieczy zawiesinowej, natomiast dla osadzarki zależność wychodu koncentratu od jego zapopielenia.

Ze względu na brak teorii podającej wyżej wymienione zależności posłużono się empiryczną metodą doboru najlepszego modelu z uprzednio ustalonego ich zbioru. Zasadniczo udało się ustalić modele, które najlepiej aproksymowały dane charakterystyki wzbogacalników.

Do analizy wpływu parametrów czujników pomiarowych i algorytmu identyfikacji na dokładność identyfikacji posłużono się metodą symulacji cyfrowej. W tym celu opracowano matematyczne modele badanych procesów z uwzględnieniem ich własności dynamicznych oraz modele nadawy, czujników pomiarowych.

Analiza wykazała, że istnieją graniczne wartości parametrów czujników pomiarowych i algorytmu identyfikacji, przy których dalsze ich zmiany nie powodują praktycznego poprawienia dokładności identyfikacji.

Uzyskane wyniki badań zagadnienia optymalizacji statycznej i sposobu mieszania produktów wzbogacania wykazały celowość optymalnego sterowania procesami wzbogacania węgla.

Przedstawione rezultaty badań zostały oparte na dotychczasowym stanie wiedzy o probabilistycznych własnościach strugi węgla surowego przychodzącego na zakład przeróbczy oraz czujników pomiarowych i dynamicznych własnościach wzbogacalników. Badanie takich zagadnień jest kosztowne i dotychczas mają one charakter tylko fragmentaryczny. Konieczne więc staje się prowadzenie dalszych badań tych zagadnień. W oparciu o uzyskane wyniki badań przedstawionych w pracy można przystąpić do konstrukcji potrzebnych

czujników pomiarowych oraz pozostałego sprzętu dla doświadczalnej weryfikacji przyjętych koncepcji systemu sterowania.

Rezultaty badań przedstawione w pracy można sformułować w następujących ogólnych wnioskach:

1. Istnieją zasadniczo dwie koncepcje kompleksowego sterowania procesami wzbogacania zakładu przeróbczego węgla, w których:
   - podstawą do wyznaczania optymalnych nastaw maszyn jest znajomość opisu matematycznego nadawy,
   - podstawą do wyznaczania optymalnych nastaw maszyn są modele matematyczne poszczególnych procesów, które traktują własności maszyn i nadawy w sposób wypadkowy.
2. W pierwszej koncepcji konieczny jest system automatycznej identyfikacji nadawy, w drugiej natomiast konieczna jest identyfikacja poszczególnych procesów elementarnych.
3. Dotychczas nie opracowano systemu automatycznej identyfikacji nadawy, chociaż modele matematyczne podające różne związki między parametrami nadawy są już dosyć dobrze opracowane.
4. Dla drugiej koncepcji sterowania w pracy wyznaczono matematyczne modele aproksymujące statyczne charakterystyki procesu wzbogacania we wzbogacalniku z cieczą ciężką i w osadzarce. Modele te mają postać dwuparametrowych funkcji regresji podających zależność wychodu i zapopielenia koncentratu w funkcji gęstości cieczy ciężkiej dla separatora zawiesinowego oraz wychodu koncentratu w funkcji jego zapopielenia dla osadzarki. Funkcje te zostały wybrane z przyjętego zbioru funkcji regresji i spełniają warunek minimalnej sumy kwadratów uchybów.
5. Wyznaczenie parametrów funkcji regresji może odbywać się drogą pomiarów natężenia i zapopielenia strug produktów wzbogacania trójproduktowych wzbogacalników.
6. Istotny wpływ na dokładność wyznaczania współczynników regresji mają takie wielkości, jak:
   - probabilistyczne parametry nadawy,
   - dokładność czujników pomiarowych - wag taśmowych i popiołomierzy,
   - czas pojedynczego pomiaru, sposobu próbkowania, liczby pomiarów i wynikający stąd czas identyfikacji.
7. Zależności te można było wyprowadzić zarówno na drodze teoretycznej, ale po przyjęciu bardzo daleko idących uproszczeń, jak i metodą symulacji. Z analizy wynika, że istnieją graniczne wartości liczby pomiarów i czasu trwania pojedynczego pomiaru, których przekroczenie nie wnosi poprawy dokładności wyznaczania współczynników regresji. Poszczególne wartości tych wielkości podane zostały we wnioskach końcowych odpowiedniego rozdziału.

8. Jak wynika z przeprowadzonych badań symulacyjnych, identyfikacja charakterystyk statycznych trójproduktowego wzbogacalnika zawiesinowego jest możliwa przy zastosowaniu założonych czujników.
9. Identyfikacja charakterystyki osadzarki bez stabilizacji jakości nadawy w oparciu o podstawową metodę identyfikacji równoczesnego pomiaru natężenia i zapopielenia strug jest mało dokładna; istnieje konieczność opracowania innej metody identyfikacji.
10. Jednym z ważnych problemów występujących w systemie kompleksowego sterowania jest zagadnienie opracowania algorytmu optymalizacji statycznej. Problem optymalizacji statycznej daje się sformułować jako zadanie programowania nieliniowego, jego charakterystyczną cechą jest istnienie maksimów lokalnych i duża liczba zmiennych decyzyjnych.
11. Istotne znaczenie ma wybór sposobu mieszania produktów wzbogacania. Z przeprowadzonych badań wynika, że jeśli jako funkcję przyjmiemy sumaryczny wychód koncentratu, to optymalny wybór struktury mieszania zwiększa znacznie wartość przyjętego kryterium w odniesieniu do przypadku procesu technologicznego, w którym nie miesza się produktów wzbogacania.
12. Automatyczne sterowanie może mieć istotne znaczenie szczególnie w dużych zakładach przeróbczych węgla, złożonych z dużej liczby systemów technologicznych, gdzie nadawa przychodząca z różnych kopalń ma różne własności. Ustalenie zaś optymalnych nastaw maszyn i struktury mieszania produktów wzbogacania może przynieść poważne efekty ekonomiczne.

7. LITERATURA

1. Ambroży J., Kolin K., Materna E., Wagner R.: Opracowanie kryteriów działania układów grawitacyjnego wzbogacania węgla drobnego ze względu na minimalizację wychodu półproduktów w zakładach przeróbczych węgla koksowego KWK Dębieńsko, Jastrzębie, Borynia. Dokumentacja GIG 1975 (praca nie opublikowana).
2. Ambroży J., Lach R., Smolińska U.: Opracowanie wytycznych do optymalizacji schematu wzbogacania i regulacji wzbogacalników dla zakładu przeróbczego KWK Knurów. Dokumentacja GIG, 1973 (praca nie opublikowana).
3. Auer A.: Model i identyfikacja procesów klasyfikacji i mielenia. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynieryjnej w Opolu nr 26, 1978.
4. Banach Z., Mączka W., Sztaba K., Tumidajski T.: Możliwości i warunki stosowania modeli regresyjnych do automatycznego sterowania procesami przeróbki kopalin na przykładzie węzła mielenia i klasyfikacji. Materiały Sympozjum "Automatyzacja procesów przeróbki mechanicznej kopalin", Katowice 1973.
5. Bobrzyński W., Gościński A., Sztaba K.: Symulowanie komputerowe procesów przeróbki rud wieloskładnikowych. Materiały Sympozjum "Automatyzacja procesów przeróbki mechanicznej kopalin", Katowice 1973.
6. Bubnicki Z.: Identyfikacja obiektów sterowania. PWN, Warszawa 1974.
7. Budryk W.: Wybór pism. T.2. KG PAN, PWN, Warszawa-Kraków 1977.
8. Chorowski B., Matecki W.: Identyfikacja procesu mielenia dla potrzeb adaptacyjnego sterowania. Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Automatyzacji Górnictwa. ICAMC, Katowice 1980.
9. Cierpisz S.: Analiza układów regulacji z cyfrowymi miernikami promieniowania jądrowego. Archiwum Automatyki i Telemechaniki nr 1, 1966.
10. Cierpisz S.: Optymalizacja produkcji w systemach sterowania procesami wzbogacania i tworzenia mieszanek węgla. Prace Ośrodka Badawczo-Rozwojowego SMEAG, Katowice 1978.
11. Cierpisz S.: Stabilizacja zawartości popiołu i wilgoci w procesach produkcji mieszanek węgla energetycznego. Prace GIG, Katowice 1975.
12. Cierpisz S.; Tarkiewicz A.: Model symulacyjny procesu przeróbki mechanicznej węgla. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 5/114, 1978.
13. Demidowicz B.P., Maron L.A., Szuwałowa E.Z.: Metody numeryczne. PWN, Warszawa 1965.
14. Gottfried B.S., Jacobson P.S., Vaillont A.: Computer Analysis of Coal Preparation Plant Performace. 14-th International Symposium on the Application of Computer Methods in the Mineral Industries. Penn State Uniwersity 1976.
15. Grzywak A.: Zastosowanie systemów minikomputerów w górnictwie. Materiały na VIII Sympozjum na temat: Systemy zarządzania i sterowania kopalniami. KG PAN, EMAG, Szklarska Poręba 1979.
16. Iwanow P.N., Jampolskij M.N.: An economical and mathematical model of a coral preparation flowsheet. Vi International coal Preparation Congress, 18E, Paris 1973.
17. Jampolskij M.N., Samylin N.A.: Zawisimost mieżdu zołnostiu elementarnych frakcji w produktach obogaszczenija i w isohodnom ugle. Koks i Chimia nr 6, 1969.

18. Jampolskij M.N., Chessin: Zawisimost wychoda wspłysznego produkta od jego zołnosti. Ugol Ukrainy nr 1, 1969.

19. Jarosewskij T.K., Vasilew A.G., Stavinskij V.A.: Issledowanije charakteristik potoka ugla na lentie konejwera. Koks i Chimia, nr 10, 1947.

20. Kalinowski K.: Optymalizacja statyczna procesów technologicznych zakładu wzbogacania węgla w systemie automatycznego sterowania. Sympozjum KG PAN nt.: "Systemy zarządzania i sterowania kopalniami", KG PAN, Szklarska Poręba 1979.

21. Kalinowski K.: Zastosowanie maszyny cyfrowej do określania optymalnych warunków wzbogacania. ZN Pol. Śl., Górnictwo nr 41, 1969.

22. Kalinowski K., Krasuoki F.: Struktura kompleksowego sterowania wzbogacaniem w zakładzie przeróbki mechanicznej węgla. Materiały Sympozjum. KG PAN nt.: "Automatyzacja procesów przeróbki mechanicznej węgla", Szczyrk 1978.

23. Kalinowski K., Krasuoki F.: Wybór funkcji identyfikującej nadawę dla automatycznego sterowania procesem wzbogacania węgla. ZN Pol.Śl.,Górnictwo z. 86, 1977.

24. Kalinowski K., Krasuoki F.: Zastosowanie maszyny cyfrowej do optymalizacji wzbogacania węgla w cieczach ciężkich. Materiały Symp. KG PAN, nt.: "Zastosowanie maszyn matematycznych w górnictwie", Nowa Ruda 1975.

25. Kalinowski K., Krasuoki F.; Błaszczyński S.: Probabilistyczny model procesu grawitacyjnego wzbogacania węgla. Materiały Symp. KG PAN nt.: "Sterowanie optymalne procesami technologicznymi w górnictwie", Ustroń 1974.

26. Kalinowski K., Krasuoki F., Miskiewicz K.: Korelacyjna i częstotliwościowa metoda analizy współczynników rozdziału procesu wzbogacania węgla. ZN Pol. Śl., Górnictwo z. 59, 1974.

27. Koohenburger R.J.: Modelowanie układów dynamicznych przy użyciu maszyn matematycznych. WNT Warszawa 1975.

28. Kolin K.: Elementy algorytmu optymalizacji układów technologicznych w świetle ich wykorzystania w projektowaniu układów automatyzacji zakładów przeróbczych. Materiały Symp. KG PAN nt.: "Automatyzacja procesów przeróbki mechanicznej kopalin", Jaszowiec 1973.

29. Kolin K.: Zastosowanie modelu symulacyjnego do prognozowania efektów wzbogacania węgla. ZN AGH z. 87, 1976.

30. Krasuoki F., Kalinowski K.: Digital simulation of automatic control and indification of the process of coal concentration in hevy liquids. 8-th Congress AICA, Delf 1976.

31. Krasuoki F., Kalinowski K., Walaszek-Babiszewska A.: Symulacja rozpoznawania rodzaju nadawy dla systemu sterowania automatycznego. ZN. Pol. Śl., Górnictwo z. 100, 1979.

32. Krasuoki F., Miskiewicz K.: O możliwości zastosowania teorii gier w sterowaniu zakładem przeróbki mechanicznej węgla w stanach awaryjnych. Materiały Symp. KG PAN nt.: "Sterowanie optymalne procesami technologicznymi w górnictwie", Ustroń 1974.

33. Krasuoki F., Miskiewicz K.: Zastosowanie symulacji cyfrowej do opracowania algorytmu sterowania zakładem wzbogacania w stanach awaryjnych. Materiały Symp. KG PAN nt.: "Zastosowanie maszyn matematycznych w górnictwie", Nowa Ruda 1975.

34. Krasuoki F., Miskiewicz K., Korpan M.: Niektóre problemy sterowania procesami wzbogacania w osadzarkach. Materiały Międzynarodowej Konferencji ICAMC, Ostrawa 1977.

35. Lach R., Cierpisz S., Mirkowski C.: Analiza własności statycznych przebiegu zmian zawartości popłołu w węglu. Wzbogacanie i Utylizacja Kopalin nr 4, 1973.

36. Mańczak K.: Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania. WNT, Warszawa 1977.

37. Meyer M., Stahlberg W.: Kurzfristige Produktionsplanung in Steinkohlenaufbereitungsanlagen mit Hilfe eines mathematischen Modeles. Bergabuwissenschaften nr 5, 1966.

38. Mokrzycki E.: Analiza kryteriów i metod określania optymalnych parametrów wzbogacania węgla. XII Krakowska Konferencja Naukowo-Techniczna Przeróbki Kopalin. Kraków 1978.

39. Müller L.: Teoria podobieństwa mechanicznego. WNT Warszawa 1969.

40. Nawrocki J.: Analityczno-graficzne metody oceny pracy wzbogacalników grawitacyjnych. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1976.

41. Nowak Z.: Klasyfikacja hydrauliczna w obiegu wodno-mułowym. ZN Pol.Śl., Górnictwo z. 43, 1970.

42. Nowak Z., Kolin K.: Application of the Monte Carlo method for determing the influence of the variability in quality of raw coals on the effect of their beneficiation. T-th International Conference ICAMC 1977, Ostrawa 1977.

43. Pudło Z.: Zależność między średnią zawartością metalu w koncentracie a średnią zawartością metalu w odpadach. Rudy i Metale nr 1, 1957.

44. Pugaczew W.S.: Teoria funkcji przypadkowej i jej zastosowanie do zagadnień sterowania automatycznego WMON, 1960.

45. Remeryj A.: Identyfikacja procesu otsadki. Koks i Chimia nr 2, 1974.

46. Stefański M.: Opłacalność wstępnego wzbogacania rud. Praca doktorska AGH, Kraków (praca nie opublikowana).

47. Sztaba K.: Problemy budowy schematu kontroli w procesach technologicznych przeróbki. Materiały Symp. KG PAN nt.: "Automatyzacja i kontrola procesów przeróbki", Katowice 1971.

48. Tarkiewicz A.: Optymalizacja i sterowanie procesami przeróbki mechanicznej węgla z wykorzystaniem cyfrowych modeli symulacyjnych. Praca doktorska. Wydz. Automatyki Pol. Śl. (praca nie opublikowana).

49. Tarkiewicz A.: Możliwości wykorzystania cyfrowych modeli symulacyjnych do optymalizacji technologii przeróbczych. Mechanizacja i automatyzacja Górnictwa 3/124, 1979.

50. Tarkiewicz A.: Sprawozdanie z wyjazdu służbowego do ZSRR. Biblioteka GIG (praca nie opublikowana).

51. Tarkiewicz A.: Wykorzystanie modelowania cyfrowego do celów prognozowania efektów wzbogacania węgla. Materiały Symp. nt.: "Automatyzacja przeróbki mechanicznej węgla", KG PAN, Szczyrk 1978.

52. Ulszin B.A.: Osnownyje princypy rozrabotki awtomatizirowannoj systiemy uprawlenija ugleobogatitielnoj fabziki. Ugol nr 2, 1974.

53. Walaszek-Babiszewska A.: Identyfikacja statyczna procesu wzbogacania węgla w cieczach ciężkich w układzie automatycznego sterowania. Praca doktorska. Wydz. Górniczy Pol. Śl., 1979. (praca nie opublikowana).

54. Walaszek-Babiszewska A., Kalinowski K.: Koncepcja identyfikacji procesów wzbogacania w zakładach przeróbki mechanicznej węgla. ZN. Pol. Śl., Górnictwo z. 61, 1975.

55. Węgrzyn S.: Podstawy automatyki. WNT Warszawa 1974.

IDENTYFIKACJA I STEROWANIE PROCESAMI WZBOGACANIA WĘGLA WE WZBOGACALNIKACH Z CIECZĄ CIĘŻKĄ I W OSADZARKACH

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

Dotychczas wyłoniły się dwie koncepcje sterowania procesami wzbogacania węgla:

- **sterowanie w oparciu o dane nadawy (analizy densymetrycznej i zapopielenia frakcji) i przyjętymi modelami wzbogacalników;**
- **sterowanie w oparciu o charakterystyki poszczególnych elementarnych procesów wzbogacania traktujących własności nadawy i wzbogacalnika w sposób wypadkowy.**

Praca związana jest z drugą koncepcją sterowania, gdzie charakterystyki statyczne wzbogacalników zostają wyznaczone drogą identyfikacji w oparciu o pomiary wykonane za pomocą odpowiednich czujników w czasie trwania procesu technologicznego. Dla analitycznego opisania takich charakterystyk opracowano dwuparametrowe modele matematyczne. Przyjęto bowiem na podstawie literatury i własnych sugestii autora pewien zbiór dwuparametrowych funkcji i wyłoniono funkcje najlepiej aproksymujące rzeczywiste charakterystyki wzbogacalników, stosując metodę najmniejszych kwadratów.

Opracowano dynamiczne modele procesów wzbogacania w wyżej wymienionych wzbogacalnikach, modele czujników zapopielenia i natężenia strug produktów wzbogacania.

W oparciu o metodę symulacji wyznaczono wpływ parametrów czujników pomiarowych oraz parametrów algorytmu identyfikacji na dokładność wyznaczania współczynników regresji przyjętych statycznych modeli. Stwierdzono, że istnieją graniczne wartości tych parametrów, przy których dokładność wyznaczania współczynników regresji nie ulega już znacznej poprawie. Otrzymane wyniki udokumentowano na wykresach.

W oparciu o przykład równolegle pracujących czterech wzbogacalników wykazano celowość optymalizacji przez odpowiedni dobór gęstości rozdziału i optymalny sposób mieszania produktów wzbogacania, szczególnie w przypadku konieczności produkcji koncentratów o różnych parametrach jakościowych.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ В СЕПАРАТОРАХ С ТЯЖЕЛОЙ СРЕДОЙ И В ОТСАДОЧНОЙ МАШИНЕ

Р е з ю м е

До тех пор появились две идеи управления процессами углеобогащения:

- управление на основании данных исходного питания (денсиметрического анализа и зольности фракции) и принятыми моделями отсадочных машин;
- управление на основании характеристик отдельных элементарных процессов углеобогащения относящихся к свойствам исходного питания и отсадочной машины результирующим способом.

Настоящая работа связана со второй идеей управления, где статические характеристики отсадочных машин определены методом идентификации на основе измерений производимых при помощи соответствующих датчиков во время технологического процесса. Для аналитического описания такого рода характеристик были разработаны двупараметровые математические модели. На основании литературных данных и собственных предложений автора было принято некоторое множество двупараметровых функций и была выбрана функция, которая лучше всех аппроксимирует действительные характеристики отсадочных машин, используя метод наименьших квадратов.

Были разработаны динамические модели процессов обогащения в вышеуказанных отсадочных машинах, модели датчиков зольности и интенсивности струи продуктов обогащения.

На основании метода симуляции было определено влияние параметров измерительных датчиков и параметров алгоритма идентификации на точность определения коэффициентов регрессии принятых статических моделей. Оказалось, что существуют граничные значения этих параметров, при которых точность определения коэффициентов регресии не подвергается существенному улучшению. Полученные результаты иллюстрируются графиками.

На основании примера параллельно работающих четырех отсадочных машин была доказана целесообразность оптимизации путем соответствующего подбора плотности распределения и оптимальный способ смешивания продуктов обогащения, особенно в случае необходимости производства концентратов с различными качественными параметрами.

STEERING AND IDENTIFICATION OF PROCESSES OF COAL ENRICHMENT IN CONCENTRATORS WITH HEAVY LIQUID AND IN JIGS

S u m m a r y

So far two method of steering coal enrichment processes have emerged:

- steering based on parameters of supplied material (densimetric analysis and contents of fraction of ashes) and on given models of concentrators;
- steering based on properties of particular elemental processes of enrichment treating properties of materials and of concentrators in the resultant way.

The paper deals with the second conception of steering, where static characteristic of concentrators is reckened by identification based on measurements carried out during the technological process with the help of the suitable detectors.

Two-parameter mathematical models have been worked out for analytical description of this characteristic. Basing on the literature and the author's own suggestions a certain set of of two-parameter functions has been accepted, and using the method of least squares the function approximating the real characteristic of concentrators in the best way has been chosen.

Dynamic models of enrichment processes in the above-mentioned concentraters, and models of detectors of ashes contents and of intensity of enrichment products stream have been worked out.

Basing on the method of simulation the influence of parameters of detectors and of parameters of identification algorithm on the exactness of reckoning parameters of regression of accepted static models has been reckoned. It has been found that there are boundary values of these parameters for which the exactness of reckoning regression parametres does not undergo any considerable improvement. The obtained results are shown on the diagrams.

Basing on the example of four concentrators working simultaneously, the usefulness of optimalization by the suitable selection of density of distribution and by the optimal way of mixing products of enrichment, and in particular in the case of necessity of production of concentrators of different quality parameters has been demonstrated.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P 3351 | 82 | 120

WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻNA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:

44-100 Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-950 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-096 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22
41-300 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1
41-200 Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN — Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.