

INSTYTUT KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raport Serii PREPRINTY Nr P-011/90

P r a c a d o k t o r s k a

MODELOWANIE MATEMATYCZNE I ANALIZA
OPTYMALIZACYJNA PROCESU PRZEŁADUNKU
MATERIAŁÓW ZIARNISTYCH KOŁEM
WIELOCZERPAKOWYM Z ODSRODKOWYM
WYSYPEM

Krzysztof Dudek

Promotor: doc. dr hab. inż. Zbigniew Korzeń

Praca wykonana w ramach tematu 02.02.13 Centralnego Programu
Badań Podstawowych Nr 02.05.: "Rozwój podstaw budowy, eksploata-
cji i badań maszyn roboczych ciężkich, w tym budowlanych".

Słowa kluczowe:

- ładowarki wieloczerpakowe
- wysyp odśrodkowy
- modelowanie matematyczne
- optymalizacja

Wrocław 1990

SPIS RZECZY

1. Wstęp	4
2. Charakterystyka obszaru badawczego	5
2.1. Geneza problemu	5
2.2. Przegląd literaturowy	6
2.3. Sformułowanie zadań badawczych - teza pracy	9
3. Charakterystyka fizyko-mechanicznych własności materia- łów ziarnistych w aspekcie ich przeładunku na składo- wiskach	10
3.1. Własności fizyczne	10
3.2. Własności mechaniczne	16
4. Badania rozpoznawcze mechaniki procesu przeładunku materiałów ziarnistych kołem wieloczerpakowym z od- środkowym wysypem	26
4.1. Stanowisko doświadczalne	27
4.2. Eksperymentalne badania rozpoznawcze	32
4.3. Zasady interpretacji wyników badań rozpoznawczych	37
5. Modelowanie wyróżnionych procesów składowych w cyklu roboczym koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysy- pem	39
5.1. Modelowanie procesu zaczerpywania materiału ziar- nistego ze zwału	39
5.2. Modelowanie procesu podnoszenia materiału ziarni- stego w kole wieloczerpakowym	45
5.3. Modelowanie procesu odśrodkowego wysypu materiału ziarnistego w kole wieloczerpakowym	47
5.3.1. Okres rozwiniętego wysypu	47
5.3.2. Okres końcowego wysypu	51
5.3.3. Faza rzutu ukośnego	55
5.3.4. Weryfikacja doświadczalna analitycznego modelu odśrodkowego wysypu w kole czepakowym	58
6. Modelowanie wydajności i energochłonności procesu ła- dowania materiałów ziarnistych kołem wieloczerpakowym z odśrodkowym wysypem	59

6.1. Wydajność teoretyczna i efektywna ładowania	59
6.2. Energochłonność ładowania	66
7. Optymalizacja kół wieloczerpakowych z odśrodkowym wysypem w warunkach procesu przeładunku materiałów zianistych na składowiskach	70
7.1. Algebraiczny schemat zadania optymalizacji	70
7.1.1. Optymalizacja w aspekcie konstrukcyjnym	71
7.1.2. Optymalizacja w aspekcie wydajnościowym	73
7.1.3. Optymalizacja w aspekcie energetycznym	74
7.2. Algorytmy optymalizacji	75
7.3. Przykładowe wyniki optymalizacji	79
8. Przykład aplikacji uzyskanych rezultatów poznawczych .	82
9. Uwagi końcowe i wnioski	87
Opis oznaczeń	92
Literatura	96
Załączniki	102
Załącznik 1. Wyprowadzenie równania różniczkowego na ruch względny elementarnej cząstki wzdłuż górnej ścianki czerpaka	102
Załącznik 2. Modele funkcjonalne k_n i M_s	105
Załącznik 3. Wyniki pomiarów α_0 i α_k	113
Załącznik 4. Przykładowe fotogramy procesu roboczego czerpaka z wysypem odśrodkowym	115

1. WSTĘP

Ciągle postępujący wzrost produkcji przemysłowej, łączy się między innymi ze zwielokrotnieniem przepływu strumienia różnego typu surowców, półproduktów i produktów finalnych. Proces ten, jest szczególnie widoczny w węzłach przeładowniczych pomiędzy różnymi rodzajami środków transportowych przystosowanych do przewożenia, bądź przenoszenia różnego typu materiałów ziarnistych.

Obecnie wyróżnić można w technice transportu i składowania materiałów ziarnistych dwa zasadnicze typy działań technologicznych:

- 1) tworzenie pojedynczych układów zbiornikowych (silosy, bunkry) lub też zwielokrotnionych systemów zbiornikowych, które współpracują z odpowiednimi układami transportu ciągłego bądź też mobilnymi środkami transportu cyklicznego;
- 2) tworzenie odkrytych bądź zadaszonych systemów składowiskowych wyposażonych w specjalistyczne maszyny i urządzenia przeładownicze.

Tendencja ta występuje we wszystkich wysoko rozwiniętych i rozwijających się krajach świata. W Polsce pierwsze próby tworzenia dużych, zmechanizowanych placów składowych pracujących zarówno w sposób ciągły jak i cykliczny, rozpoczęto już w początkach lat sześćdziesiątych, głównie w energetyce bazującej na węglu brunatnym oraz w przeładunkach portowych. Obecnie technika mechanicznego przeładunku materiałów ziarnistych magazynowanych na dużych składowiskach o kształcie wydłużonym lub okrągłym, obejmuje również takie gałęzie gospodarki jak: hutnictwo, przemysł materiałów budowlanych, chemicznych, przetwórstwa odpadów itp.

Konieczność zapewnienia dużych wydajności przeładunku na składowiskach (rzędu kilku tysięcy m³ w ciągu godziny) pociągnęła za sobą wymóg budowy specjalistycznych maszyn i urządzeń przeładowniczych o ruchu ciągłym. Są to głównie tzw. ładowarki kołowo-czerpakowe, zwałowarki taśmowe, ładowarko-zwałowarki, przeładowniki statków i barek, ładowarki bębnowe, suwnicowe itp. Układy tego typu maszyn połączone liniami taśmociągów i dodatkowo wyposażone w elementy kontrolno-pomiarowe, układy automatyki

oraz komputerowe układy przetwarzania danych, tworzą zintegrowane logistyczne systemy zapewniające optymalne i bardzo sprawne funkcjonowanie nowoczesnych składowisk.

Niniejsza praca wiąże się z problematyką budowy nowej generacji wysokowydajnych i materiałooszczędnych kołowo-czerpakowych maszyn przeładowniczych, a w szczególności, dotyczy teorii konstrukcji szybkoobrotowych kół czerpakowych realizujących proces przeładunku materiału ziarnistego na składowisku w warunkach odśrodkowego opróżniania czerpaków. Praca ta została całościowo wykonana w ramach tematu 02.02.13 realizowanego przez Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej w Centralnym Programie Badań Podstawowych 02.05 pt.: **Rozwój podstaw budowy, eksploatacji i badań maszyn roboczych ciężkich w tym budowlanych.** Kierownik Programu: Prof. dr hab. inż. Stanisław Oziemski.

2. CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAWCZEGO

2.1. Geneza problemu

Proces szybkiego wprowadzania wieloczerpakowych ładowarek o ruchu ciągłym na duże, odkryte składowiska materiałów ziarnistych spowodował, że w rozwoju konstrukcyjnym tych maszyn, odegrały znaczącą rolę doświadczenia i prawidłowości odnoszące się do koparek kołowych wielonaczyniowych, których charakter pracy jest jakościowo taki sam, jak ładowarek wieloczerpakowych - natomiast początki ich rozwoju sięgają jeszcze okresu międzyjennego. Z wielonaczyniowych koparek kołowych adaptowano do warunków konstrukcyjnych ładowarek kołowoczerpakowych nie tylko szereg zespołów i podzespołów, ale również metody obliczania poszczególnych mechanizmów, a w szczególności mechanizmu ładowania, w którym koło czerpakowe odgrywa rolę dominującą.

Istniejąca obecnie różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych ładowarek kołowo-czerpakowych [68] i pewna suma doświadczeń zgromadzona w toku ich eksploatacji [8], [16], [17], [19], [20], [21], [22] wykazują, że koło wieloczerpakowe ładujące materiał ziarnisty zalegający na zwale nie może być konstruowane w opar-

ciu o zasady, które zostały ustalone dla koła wielonaczyniowego w koparce urabiającej rodzimy, spoisty grunt lub słabozwiązłą skałę, ponieważ prowadzi to do nieracjonalnych rozwiązań konstrukcyjnych maszyny ładującej. O ile bowiem w wielonaczyniowych koparkach kołowych stosowanych w górnictwie odkrywkowym, racjonalne kształtowanie koła urabiającego winno wynikać z zasady optymalności procesu urabiania: minimalizacji działających obciążeń oraz minimalizacji jednostkowej pracy skrawania skał i gruntów o określonych własnościach fizyko-mechanicznych, to racjonalne kształtowanie wieloczerpakowego koła ładującego materiał ziarnisty zalegający w stanie rozluźowanym na składowisku, winno być realizowane w aspekcie maksymalnej zdolności przepływu strumienia urobku przez układ konstrukcyjny koła [17], [31], [51]. Konwencjonalne rozwiązania budowanych dotychczas kół wieloczerpakowych przystosowanych do przeładunku różnego typu materiałów ziarnistych magazynowanych na odkrytych składowiskach, charakteryzują się grawitacyjnym sposobem opróżniania черpaków, co z góry narzuca ograniczenie ich prędkości obwodowej przy zadanej średnicy zewnętrznej; prędkość ta winna być tak dobrana, aby siła odśrodkowa działająca na poszczególne cząstki materiału w ruchu kołowym черpaków, stanowiła jedynie pewien dopuszczalny ułamek składowej promieniowej od siły ciężkości działającej na te cząstki [34], [51]).

Narzucone w ten sposób kinematyczne ograniczenie, ogranicza siłą rzeczy potencjalne możliwości wydajnościowe koła черpakowego z wysypem grawitacyjnym. Powstaje zatem pytanie: jakie są granice wzrostu dla prędkości obwodowej w szybkoobrotowym kole черpakowym realizującym wysyp odśrodkowy w powiązaniu z jego głównymi parametrami geometrii i technologii pracy oraz jak kształtują się relacje pomiędzy efektywną wydajnością i energochłonnością roboczego procesu takiego koła.

2.2. Przegląd literaturowy

Z analizy obszaru badawczego dotyczącego teorii konstrukcji i eksploatacji maszyn urabiających i ładujących o ruchu ciągłym wynika, że istniejące opracowania związane z problematyką roz-

patrywana w niniejszej pracy dotyczą prawie wyłącznie wieloczerpakowych kół z wysypem grawitacyjnym i można je podzielić na dwie grupy:

- 1) grupę prac, w których rozpatrywane są problemy syntezy geometrycznej, analizy wydajnościowej, analizy obciążeń oraz analizy optymalizacyjnej wielonaczyniowych kół koparkowych, realizujących proces ciągłego urabiania rodzimych złóż mineralnych oraz gruntów i skał nadkładowych,
- 2) grupę prac, w których rozpatrywane są problemy kojarzenia z sobą i optymalizacji głównych parametrów charakteryzujących geometrię, kinematykę i technologię pracy wieloczerpakowych kół ładowarkowych realizujących proces ciągłego przeładunku materiałów ziarnistych na składowiskach.

W grupie prac dotyczących wielonaczyniowych kół koparkowych należy wymienić przede wszystkim zbiór klasycznych już opracowań, w których zostały sformułowane fundamentalne podstawy obliczeniowe wielonaczyniowych układów roboczych realizujących proces mechanicznego urabiania [3], [6], [9], [18], [57].

Dość liczna jest również grupa opracowań, w których analizowano pewne szczegółowe aspekty roboczego procesu wielonaczyniowych kół koparkowych wiążące się przede wszystkim z branżą górnictwa odkrywkowego węgla brunatnych, np. [16], [17], [45], [50], [55], [64].

Problematyka analizy wydajnościowej oraz modelowania warunków wysypowych w wielonaczyniowych kołach koparkowych pracujących wg zasady odśrodkowego opróżniania naczyń urabiających była rozpatrywana w pracach Taranowa [65], [66].

Znane dotychczas opracowania dotyczące wieloczerpakowych kół ładowarkowych dają się z kolei podzielić na:

- grupę opracowań analitycznych, w których rozpatrywane były warunki przepływu strumienia materiału ziarnistego przez obszar koła czerpakowego [11], [31], [51];
- grupę opracowań typu doświadczalnego realizowanych w warunkach laboratoryjnych na specjalnie przygotowanych do tego celu stanowiskach doświadczalnych [43], [43], [46], [51];
- grupę opracowań eksploatacyjnych, w których charakteryzowano różne technologiczne aspekty roboczego procesu kół czerpako-

wych na składowiskach, np. [8], [19], [20], [21], [22], [49], [50].

Dotychczas w literaturze przedmiotu, jedynie praca [51] stanowi kompleksowe ujęcie problematyki racjonalnego kształtowania kół wieloczerpakowych z grawitacyjnym wysypem, przystosowanych do przeładunku materiałów ziarnistych o zdefiniowanych własnościach fizyko-mechanicznych. Należy podkreślić, że problematyka odśrodkowego wysypu materiałów ziarnistych w mechanicznych układach przeładowniczych, była dotychczas w najszerszym zakresie podejmowana w grupie szybkobieżnych przenośników kubełkowych [2], [5], [33], [40], [41], [42], [44], [61], [67]. Kompleksowe ujęcie problematyki racjonalnego kształtowania szybkobieżnych, ciągnowo-czerpakowych układów przeładowniczych realizujących odśrodkowy proces wysypu, zawiera praca [10]. Problematyka ta została również podjęta w wieloetapowej pracy [14]. Z opracowań tych - aczkolwiek ujmujących rozpatrywany problem w sposób dość zróżnicowany i często dyskusyjny - wynika generalny wniosek, że koncepcja odśrodkowego opróżniania szybkobieżnych układów roboczych stwarza pod względem wydajnościowym i konstrukcyjnym możliwość kreowania nowej generacji maszyn przeładowniczych o ruchu ciągłym. Poprawna praca ciągnowo-czerpakowego układu roboczego w przenośniku kubełkowym pracującym wg zasady odśrodkowego wysypu urobku, wymaga jednak spełnienia następujących podstawowych warunków:

- forma ukształtowania, rozstaw i pojemność czerpaków winny zapewniać możliwie duży stopień ich napełniania w warunkach szybkobieżnego zaczerpywania materiału ziarnistego gromadzonego w punkcie nadawczym,
- forma ukształtowania, prędkość i rozstaw czerpaków oraz konstrukcja węzła rozładowniczego winny zapewnić niezakłócony wysyp urobku oraz jego ukierunkowany spływ w obszar działania układu odbierającego zsypu.

Z analizy bibliograficznej dotyczącej rozpatrywanego zagadnienia wynika jednoznaczny wniosek, że dotychczas brak jest metody obliczeniowej, umożliwiającej racjonalne kojarzenie z sobą i optymalizację podstawowych parametrów geometrycznych i kinematycznych koła wieloczerpakowego realizującego inny niż grawita-

cyjny sposób opróżniania czerpaków.

2.3. Sformułowanie zadań badawczych - teza pracy

W oparciu o przeprowadzone studia literaturowe oraz w nawiązaniu do wniosków wynikających z obserwacji oraz analizy roboczego procesu szybkobieżnych ciągnowo-czerpakowych układów przeładunkowych realizujących odśrodkowy proces wysypu urobku w przenośnikach kubełkowych, w niniejszej pracy podjęto próbę:

- ustalenia fenomenologicznych aspektów procesu zaczerpywania i odśrodkowego wysypu materiałów ziarnistych w szybkoobrotowym kole wieloczerpakowym;
- opisu dynamiki przepływu strumienia materiału ziarnistego przez układ konstrukcyjny koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysypem;
- syntezy algebraicznego schematu zadania optymalizacji koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysypem w aspekcie maksymalizacji przepływu strumienia urobku przez układ konstrukcyjny koła z jednoczesną minimalizacją energochłonności tego procesu;
- syntezy numerycznego algorytmu doboru podstawowych parametrów geometrii, kinematyki i technologii pracy kół wieloczerpakowych z odśrodkowym wysypem, przystosowanych do przeładunku materiałów ziarnistych o określonych własnościach fizyko-mechanicznych.

Realizację powyższych zadań badawczych oparto na sformułowanej niżej tezie.

Teza pracy:

Efektywność roboczego procesu koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysypem (mierzona efektywną wydajnością oraz jednostkową energochłonnością przeładunku) jest ściśle związana z parametrami jego geometrii, kinematyki, technologii pracy oraz cechami fizyko-mechanicznymi ładowanego materiału. Matematyczne modelowanie tego procesu z dokładnością wymaganą w zastosowaniach praktycznych jest możliwe poprzez wydzielenie powtarzalnych sekwencji ruchu koła czerpakowego, obejmujących:

- fazę szybkobieżnego napełniania czerpaków;

- fazę podnoszenia zaczerpniętych porcji urobku w ruchu kołowym czerpaków;
 - fazę odśrodkowego wysypu urobku z czerpaków;
 - fazę rzutu ukośnego pojedynczych ziaren oraz grup ziaren w obszar wężła zsypowego (układu odbierającego strumień urobku).
- Istnieje również możliwość takiego kojarzenia z sobą liczbowych wartości parametrów geometrii, kinematyki i technologii pracy kół czerpakowych z odśrodkowym wysypem, dla których spełniona jest zasada minimalnej zewnętrznej średnicy bądź też minimalnej jednostkowej energochłonności procesu przeładunku materiału ziarnistego o określonych własnościach fizyko-mechanicznych przy żądanej wydajności tego procesu.

3. CHARAKTERYSTYKA FIZYKO-MECHANICZNYCH WŁASNOŚCI MATERIAŁÓW ZIARNISTYCH W ASPEKcie ICH PRZEŁADUNKU NA SKŁADOWISKACH

3.1. Własności fizyczne

Specyfika fizycznych własności materiałów ziarnistych wynika głównie z ich dwu- lub trójfazowej budowy, przy czym, fazę stałą stanowią ziarna o różnej wielkości i kształcie, rozumiane jako monokryształy, polikryształy, aglomeraty i agregary; natomiast pozostałe dwie fazy, tzn. ciekła i gazowa, wypełniają pory i luki międzyziarnowe.

Materiał ziarnisty w sensie strukturalnym charakteryzują:

- porowatość n_p [%]

$$n_p = \frac{V - V_F}{V}, \quad (1)$$

- wskaźnik porowatości e [%]

$$e = \frac{V - V_F}{V_F} = \frac{n_p}{1 - n_p}, \quad (2)$$

- powierzchnia właściwa O [$\frac{1}{m}$]

$$O = \frac{O_F}{V_F}, \quad (3)$$

- średni promień hydrauliczny por, luk i pustek międzyziarnowych
 r [m]

$$r_p = \frac{V - V_F}{O_F} = \frac{n}{O \cdot (1 - n)} = \frac{e}{O}, \quad (4)$$

przy czym:

V - objętość reprezentatywnej próbki materiału ziarnistego
 przyjętej do analizy, [m³];

V_F - objętość fazy stałej w próbce, [m³];

O_F - całkowita powierzchnia fazy stałej w próbce, [m²].

W przypadku jednorodnego zbioru ziaren kulistych o średnicy d otrzymuje się:

$$O = \frac{6}{d}, \quad (5)$$

natomiast w przypadku niejednorodnego zbioru ziaren o nieregularnym kształcie obowiązuje relacja:

$$O = 6 * \frac{1}{\psi_A} * \sum_{i=1}^p \frac{\Delta d_i}{\bar{d}_i} \quad (6)$$

gdzie:

ψ_A - współczynnik kształtu ziarna

$$\psi_A = \left(\frac{d_V}{d_O} \right)^2, \quad d_V = 3 \sqrt{\frac{6}{\pi} * V_p}, \quad (7)$$

przy czym:

d_V - objętościowo ekwiwalentna średnica kuli, [m];

d_O - powierzchniowo ekwiwalentna średnica kuli, [m];

V_p - objętość ziarna rzeczywistego, [m³],

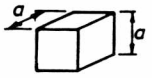
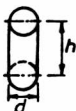
$\bar{d}_i$ - średnia arytmetyczna i-tej klasy ziarnowej, [m];

Δd_i - udział masowy i-tej klasy ziarnowej w masie całej próbki
 przyjętej do analizy;

p - liczba klas (przedziałów) ziarnowych uwzględnionych w toku
 analizy granulometrycznej.

W tabeli I zestawiono liczbowe wartości współczynnika ψ_A dla kształtów ziaren, które najczęściej są spotykane na odkrytych składowiskach [36].

Tab.I. Zestawienie współczynników kształtu ziaren najczęściej spotykanych na składowiskach surowców mineralnych

Kształt ziarna	Ekwiwalentna średnica ziarna	Współczynnik kształtu ziarna
	d_v	ψ_A
	d	1
	$1,241a$	0,806
 $a \times b \times c$ $a \times 2a \times a$ $a \times 2a \times 2a$ $a \times 2a \times 3a$ $a \times a \times 0,1a$ $a \times a \times 0,01a$	$1,563a$ $1,970a$ $2,253a$ $0,576a$ $0,267a$	$0,767$ $0,761$ $0,725$ $0,435$ $0,110$
 $h = 2d$ $h = d$ $h = 0,5d$ $h = 0,15d$ $h = 0,001d$	$1,442d$ $1,145d$ $0,909d$ $0,608d$ $0,247d$	$0,831$ $0,875$ $0,826$ $0,570$ $0,120$

Średnicę d_m średniego ziarna w rozpatrywanej, reprezentatywnej próbce materiału o objętości V określa wzór:

$$d_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^p \frac{\Delta d_i}{d_i}} \quad (8)$$

W zagadnieniach praktycznych dotyczących oceny parametru d_m , dla urobku stanowiącego przedmiot zaczerpywania narzędziami roboczymi maszyn ładujących, wystarczająco efektywna jest metoda analizy sitowej realizowanej zgodnie z normą PN-66/B-06714 na zestawie sit o wymiarach oczek d_i :

$$d_i = [2, 5, 8, 10, 16, 20, 25, 40, 60, 80, 120], [\text{mm}]$$

w odniesieniu do objętości próbki materiału V [m^3] odpowiadającej teoretycznej pojemności V_t [m^3] narzędzia ładującego (czerpaka) tzn.:

$$V = V_t \quad (9)$$

Najogólniej można przyjąć, że wymiary pojedynczych ziaren budujących przestrzenną strukturę zwału materiału ziarnistego zawierają się pomiędzy wymiarami molekuł ($d \cong 10^{-9}$ [m]) oraz wymiarami człowieka ($d \cong 10^0$ [m]).

W opracowaniach normowych różnych krajów stosowana jest bardzo często klasyfikacja granulometryczna materiałów ziarnistych przedstawiona na rys. 1, wg której materiały te dzielone są na:

- pyłowe $d < 0,05$ [m],
- proszkowe $0,05 \leq d < 0,5$,
- drobnoziarniste $0,5 \leq d < 2,0$,
- średnioziarniste $2,0 \leq d < 10$,
- gruboziarniste $10 \leq d < 60$,
- drobnokawałkowe $60 \leq d < 160$,
- średniokawałkowe $160 \leq d < 400$,
- grubokawałkowe $400 \leq d$.

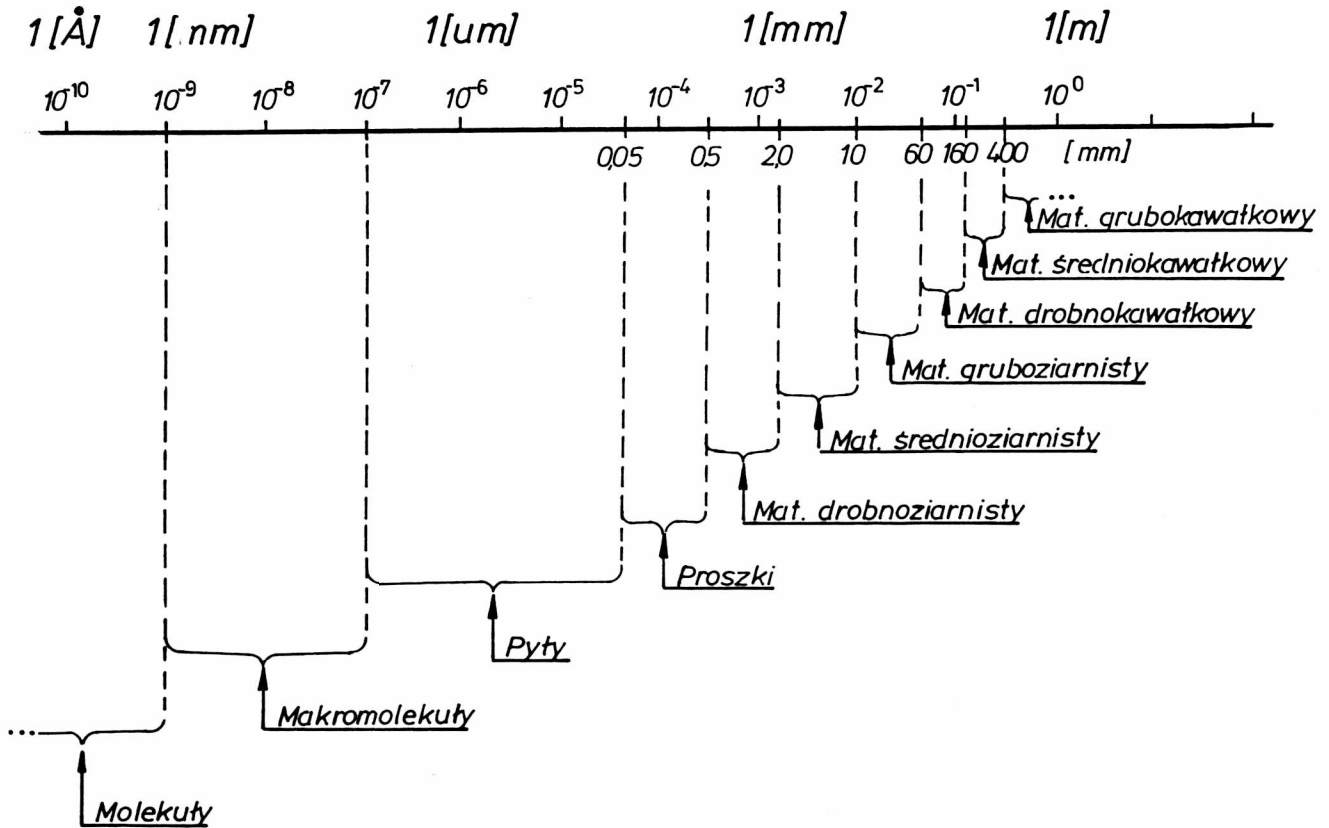
Fracje grubokawałkowe (blokowe), zawarte w zwale materiału ziarnistego, traktowane są zazwyczaj jako wtrącenia losowe i wymagają odseparowania lub też są rozbijane jeszcze na etapie początkowego cyklu przeładowniczego.

Sortowane, jednorodne materiały ziarniste składowane na zwale, winny spełniać relację:

$$\frac{d_{\min} + d_{\max}}{2} \leq 2,5 \quad (10)$$

gdzie: $d_{\min}$ i $d_{\max}$ określają odpowiednio najmniejszą i największą średnicę ziarna w rozpatrywanej, reprezentatywnej próbce materiału o objętości V wg (9).

Bardzo duże zróżnicowanie wymiarów pojedynczych ziaren budujących przestrzenną strukturę zwału powoduje, że stan zagęszczenia tych ziaren może w określonych warunkach obciążeń zewnętrznych ulegać dość istotnym zmianom.



Rys.1. Klasyfikacja materiałów ziarnistych wg wymiarów ziaren

Współczynnik zagęszczenia materiału ziarnistego k_e definiowany jest następująco:

$$k_e = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (11)$$

gdzie: $e_{\max}$, $e_{\min}$ - maksymalna i minimalna możliwa do uzyskania wartość wskaźnika porowatości e .

W zależności od wartości parametru k_e rozróżnia się następujące stany zagęszczenia materiału ziarnistego:

- $k_e \leq 0,33$ - luźny
- $0,33 < k_e \leq 0,67$ - słabo zagęszczony
- $0,67 < k_e \leq 1,0$ - zagęszczony.

Zjawisko spulchnienia zleżącego materiału ziarnistego na zwale, powodowane wymuszonym działaniem narzędzi ładujących, charakteryzowane jest współczynnikiem spulchnienia k_s :

$$k_s = \frac{\gamma_z}{\gamma}, \quad \gamma = \rho * g \quad (12)$$

gdzie:

γ_z - ciężar objętościowy materiału zleżącego na zwale, [kN/m³];

γ - ciężar usypowy materiału ziarnistego w stanie spulchnienia, [kN/m³].

Faza ciekła (woda) może występować w masie materiału ziarnistego w postaci tzw. wody swobodnej, kapilarnej, błonkowej (na powierzchni ziaren) bądź też w postaci pary wodnej wypełniającej pory i luki międzyziarnowe.

Wilgotność X_w [%] materiału ziarnistego określona jest stosunkiem objętości wody zawartej w porach V_w do objętości fazy stałej V_F :

$$X_w = \frac{V_w}{V_F} \quad (13)$$

Natomiast stopień wilgotności S_w materiału ziarnistego określony jest stosunkiem objętości wody zawartej w porach V_w do całkowitej objętości por $V_L = V - V_F$:

$$S_w = \frac{V_w}{V - V_F} \quad (14)$$

Rozróżnia się następujące trzy stany zawilgocenia materiałów ziarnistych:

- powietrzno-suchy $0 < S_w \leq 0,4$,
- wilgotny $0,4 < S_w \leq 0,8$,
- mokry $0,8 < S_w \leq 1,0$.

W analizie strukturalnych cech materiałów ziarnistych, rolę równie znaczącą jak skład ziarnowy i porowatość, odgrywa również masa właściwa fazy stałej ρ_F .

Gęstość usypowa ρ materiału ziarnistego związana jest z masą właściwą fazy stałej ρ_F następującą zależnością:

$$\rho = \rho_F * \frac{1}{1 + e} = \rho_F * (1 - n) \quad (15)$$

W procesach mechanicznego przeładunku i składowania jest obserwowane duże zróżnicowanie cech strukturalnych w pewnych charakterystycznych grupach materiałów ziarnistych. Takie specyficzne zróżnicowanie cech strukturalnych wykazują przede wszystkim:

- materiały miłkie (pyłaste, proszkowe, drobnoziarniste),
- grunty rozluźwane (urobek gruntowy),
- skały rozluźwane (urobek skalny).

Materiały miłkie w większości przypadków stanowią półprodukt lub produkt finalny w procesach przeróbki mechanicznej bądź chemicznej surowców mineralnych, tworzyw sztucznych, odpadów, płodów rolnych, środków spożywczych, farmaceutycznych, chemicznych itp.

Grunty rozluźwane stanowią najczęściej produkt mechanicznego urabiania różnego typu słabozwięzłych złóż mineralnych i materiałów nadkładowych typu gruntowego.

Skały rozluźwane są najczęściej uzyskiwane w wyniku mechanicznego bądź wybuchowego urabiania i rozkruszania średnio- i silniezwięzłych skał.

3.2. Własności mechaniczne

Stan obciążenia w elementarnym obszarze materiału ziarnistego o długości boków dx , dy , dz (rys.2a) jest określony przez dziewięć składowych naprężeń, mierzonych jako stosunki odpowiednich sił przypadających na jednostkę powierzchni [52], [63]. Symbolem σ oznaczono w dalszym ciągu składowe normalne, natomiast symbolem τ składowe styczne działających naprężeń.

Składowe naprężenia oznaczone na rys.2a tworzą symetryczny tensor σ :

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{zx} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (16)$$

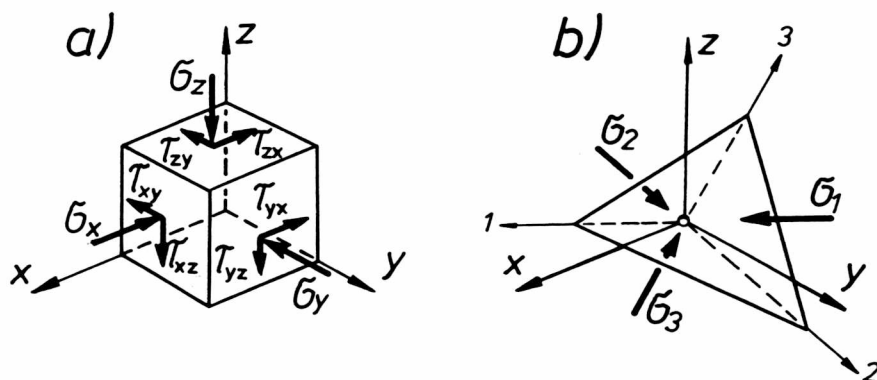
w którym wskaźniki ij przyjmują kolejno wartości $ij = [x, y, z]$

we wszystkich dziewięciu możliwych kombinacjach, przy czym jak wiadomo

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}. \quad (17)$$

W przyjętym układzie współrzędnych x, y, z można zawsze znaleźć takie trzy wzajemnie prostopadłe płaszczyzny, na których działają tylko naprężenia normalne $\sigma_1 \geq \sigma_3 \geq \sigma_2$ określone mianem naprężeń głównych (rys.2b) i wówczas

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$



Rys.2. Składowe stanu naprężenia w obszarze elementarnym materiału ziarnistego

Znając kierunki główne i wartości naprężeń głównych, można wyznaczyć naprężenia styczne i normalne na płaszczyźnie dowolnie usytuowanej względem kierunków głównych [63]. Stan naprężenia na płaszczyznach dowolnie nachylonych względem osi głównych może być również - w ogólnie znany sposób - określony za pomocą wykresnego odwzorowania Mohra.

Pojęcie stanu granicznego w materiale ziarnistym jest pojęciem umownym i oznacza taki stan, przy którym następuje początek zniszczenia lub zaawansowanego plastycznego płynięcia elementarnych obszarów tego typu materiału. Osiągnięcie

krytycznego stanu naprężenia, przy którym w izotropowym materiale ziarnistym mogą rozwinąć się odkształcenia plastyczne, jest związane z osiągnięciem przez elementy tensora naprężenia σ wg (16) takich wartości, iż spełniona zostanie zależność [7]:

$$F(\sigma_{ij}, \rho) = 0, \quad \rho - \text{wg (15)}.$$

Zależności typu (19) są określane mianem warunków stanu granicznego. Warunki stanu granicznego są jednakże tylko pewnymi hipotezami, ponieważ nie jest znany dotychczas sposób ich teoretycznego wyprowadzenia.

Ogólna koncepcja opisu plastycznych cech materiałów ziarnistych za pomocą klasy modeli uwzględniających zmianę gęstości ρ jako parametru ich wzmocnienia bądź osłabienia, została szczegółowo scharakteryzowana w pracy [7]. Praktyczne wykorzystanie modeli plastycznych do analizy zagadnień związanych z zachowaniem się materiałów ziarnistych w konkretnych procesach ich składowania zawdzięczamy przede wszystkim pracom Jenike [26] i Molerusa [52]. Szereg badań wykonanych w różnych materiałach ziarnistych wykazuje, że o ich uplastycznieniu w złożonym stanie naprężenia decydują przede wszystkim wartości największego σ_1 i najmniejszego σ_2 z panujących w materiale trzech naprężeń głównych $\sigma_1 > \sigma_3 > \sigma_2$ [7].

Ogólną postać warunku plastyczności można zatem w sposób alternatywny do zależności (19) wyrazić następująco:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \rho) = 0 \quad (20)$$

Istotną cechą warunku plastyczności o postaci (20) jest możliwość przedstawienia jego geometrycznej reprezentacji na płaszczyźnie Mohra, którą wyraża składowa styczna $\tau(\rho)$ i normalna $\sigma(\rho)$ wektora naprężenia. Na płaszczyźnie $\langle \sigma, \tau \rangle$ każdy stan naprężenia wyrażony przez σ_1 i σ_2 przedstawiony jest kołem.

Zbiór stanów spełniających warunek

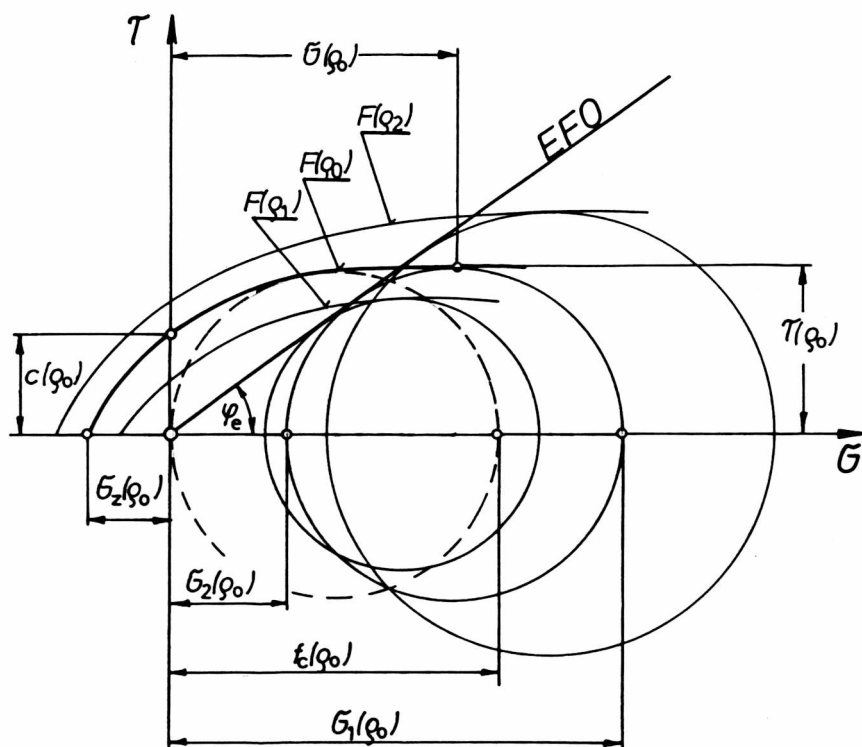
$$\tau = f(\sigma, \rho), \quad \rho = \rho_0, \rho_1, \dots, \rho_x \quad (21)$$

jest więc zbiorem odpowiednich kół Mohra (rys.3).

Zmienność funkcji (21) z uwzględnieniem gęstości ρ jako parametru daje się w ogólności wyrazić funkcją potęgową (równanie Warren'a-Spring'a) o postaci:

$$\left[\frac{\tau(\rho)}{c(\rho)} \right]^n = \frac{\sigma + \sigma_z(\rho)}{\sigma_z(\rho)} \quad (22)$$

W praktycznych przypadkach wykładnik potęgowy n mieści się w przedziale $1 \leq n \leq 2$.



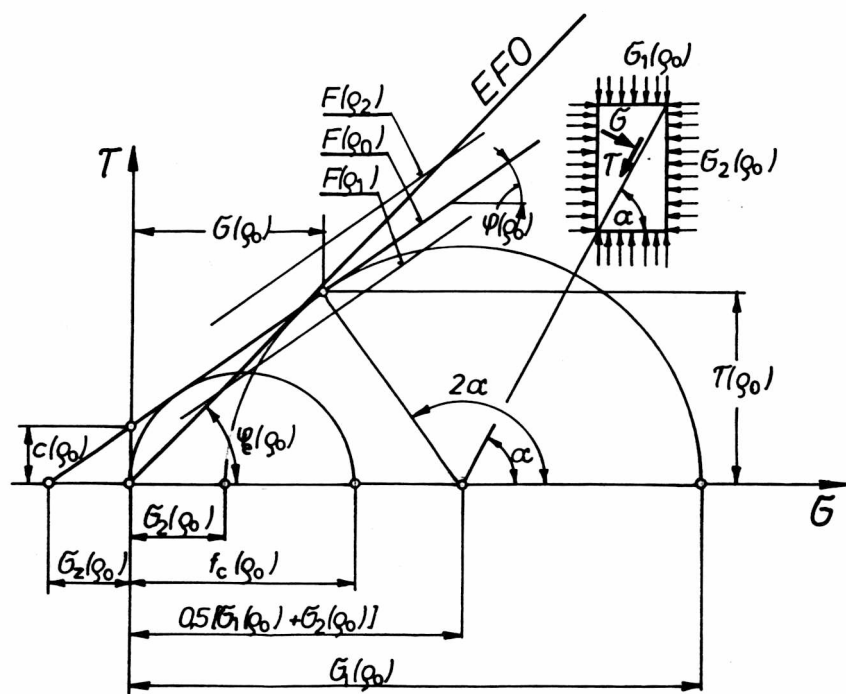
Rys. 3. Geometryczna reprezentacja warunku stanu granicznego w materiale ziarnistym

Dla $n = 1$ równanie (22) przechodzi w znaną zależność liniową (rys. 4):

$$\begin{aligned} \tau &= \sigma * \operatorname{tg} \phi(\rho) + c(\rho) = [\sigma + \sigma_z(\rho)] * \operatorname{tg} \phi(\rho) = \\ &= \sigma * \operatorname{tg} \phi(\rho) + f_c(\rho) * \frac{\sin \phi(\rho)}{2 * [1 + \sin \phi(\rho)]} \end{aligned} \quad (23)$$

Zależności (22) i (23) odnoszą się do modelu płynięcia, który w literaturze przedmiotu jest określany mianem "modelu plastycznego z wzmocnieniem i osłabieniem".

W myśl tego modelu na każdej z wypukłych krzywych reprezentujących warunki plastyczności w zależności od parametru $\rho = [\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_x]$ istnieje pewien punkt, w którym wektorowi przyrostu odkształceń postaciowych towarzyszy zerowa wartość odkształceń objętościowych. Na rys.3 punkty te leżą na linii OE rozgraniczającej stany naprężeń powodujących rozluźnianie i zagęszczanie materiału. W literaturze przedmiotu linia OE określana jest mianem linii krytycznej. Po osiągnięciu przez stan naprężenia tej linii, kohezyjny materiał ziarnisty zachowuje się jak nieściśliwy i stan naprężenia nie ulega zmianie.



Rys.4. Zlinearyzowane warunki stanu granicznego
w materiale ziarnistym

Bardziej uproszczonym od modelu plastycznego ze wzmocnieniem i osłabieniem jest tzw. model sztywno-idealnie plastyczny, pierwotnie zaproponowany dla metali. Szczegółowe omówienie możliwości tego modelu w zastosowaniu do analizy zagadnień związanych z mechaniką materiałów ziarnistych zawiera praca [63]. W modelu tym pominięto wzmocnienie i osłabienie materiału zakładając, że deformacje rozwijają się przy stałej wartości naprężenia. Model sztywno-idealnie plastyczny może być przyjęty w opisie zachowania się kohezyjnego materiału ziarnistego w

stanach odpowiadających linii krytycznej OE wg rys.3. Jeżeli zostanie przyjęte założenie, że linia ta jest prosta, a ponadto przechodzi przez początek układu współrzędnych (takie założenie uzasadniają wyniki badań prowadzonych w różnego typu materiałach ziarnistych [7]), to warunek plastyczności przyjmie postać:

$$\tau = \sigma * \operatorname{tg} \phi_e \quad (24)$$

gdzie:

ϕ_e - efektywny kąt tarcia wewnętrznego, [$^{\circ}$].

W materiałach bezkohezyjnych kąt tarcia wewnętrznego ϕ oraz efektywny kąt tarcia wewnętrznego ϕ_e są sobie równe, tzn.

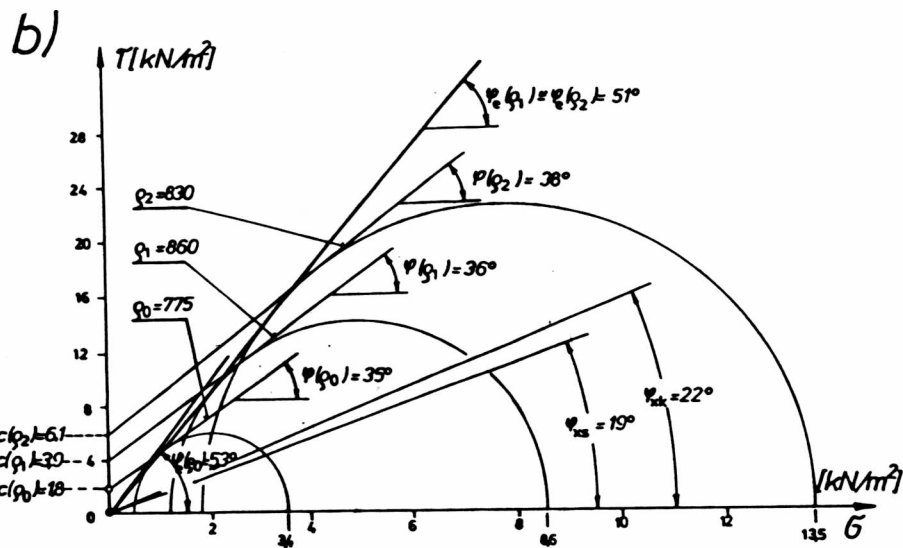
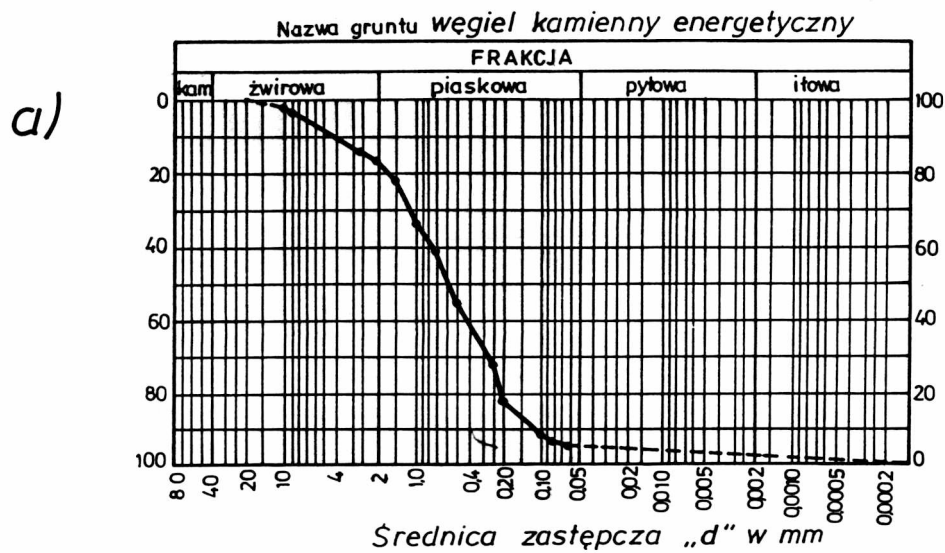
$$\phi = \phi_e \quad (25)$$

Na rys.5b pokazano przykład geometrycznej reprezentacji warunku stanu granicznego dla drobnoziarnistego węgla kamiennego o wilgotności $X_w = 10 \div 15 \%$ i składzie granulometrycznym jak na rys.5a.

Model operujący pojęciem efektywnego kąta tarcia wewnętrznego ϕ_e jest matematycznie prostszy od modelu ze wzmocnieniem i osłabieniem, a stąd szersze są możliwości jego praktycznego wykorzystania.

Dla warunków plastyczności zależnych jedynie od największego i najmniejszego naprężenia głównego, w miejsce aktualnej gęstości można wprowadzić jako parametr wzmocnienia sam stan naprężenia tzn. aktualną wartość jednego z naprężeń σ_1, σ_2 (najwygodniejsze jest użycie do tego celu naprężenia σ_1).

W przypadku stanu naprężenia, w którym położenie największego koła Mohra jest determinowane zadaną wartością naprężenia σ_1 (rys.5) i znana jest aktualna wartość kohezji $c = c(\sigma_1)$ względnie granicy plastyczności na jednoosiowe ściskanie $f_c = f_c(\sigma_1)$ oraz kąt tarcia wewnętrznego $\phi = \phi(\sigma_1)$



Rys.5. Wykres uziarnienia (a) i przykład geometrycznej reprezentacji warunku stanu granicznego (b) dla drobnoziarnistego węgla kamiennego

otrzymuje się:

$$\phi_e(\sigma_1) = \arcsin \frac{\sigma_1 * \sin \phi(\sigma_1) + c(\sigma_1) * \cos \phi(\sigma_1)}{\sigma_1 - c(\sigma_1) * \cos \phi(\sigma_1)} =$$

$$= \arcsin \frac{\sigma_1 * \sin \phi(\sigma_1) + f_c(\sigma_1) * \frac{\cos^2 \phi(\sigma_1)}{2 * [1 + \sin \phi(\sigma_1)]}}{\sigma_1 - f_c(\sigma_1) * \frac{\cos^2 \phi(\sigma_1)}{2 * [1 + \sin \phi(\sigma_1)]}} \quad (26)$$

Uzależniając wartość granicy plastyczności na jednoosiowe ściskanie f_c od naprężenia σ_1 dla stanów leżących na linii krytycznej opisanej równaniem (24), można w oparciu o wyniki prób realizowanych w aparacie bezpośredniego ściskania wg metody Jenike [26] lub wg zmodyfikowanej metody Mroza [53] wykreślić zależność $f_c = f_c(\sigma_1)$, [7].

Okazuje się, że zmienność naprężenia σ_1 w funkcji f_c daje się z dokładnością wystarczającą w zastosowaniach praktycznych aproksymować liniową funkcją regresji o postaci:

$$\sigma_1 = a_2 * f_c - a_1 \Rightarrow f_c = \frac{1}{a_2} * \sigma_1 + \frac{a_1}{a_2}, \quad (27)$$

a w niektórych przypadkach funkcją kwadratową:

$$\sigma_1 = a_3 * f_c^2 + a_2 * f_c - a_1 \Rightarrow f_c = \frac{\sqrt{a_2^2 + 4 * a_3 * (a_1 + \sigma_1)} - a_2}{2 * a_3}. \quad (28)$$

Na rys.6. pokazano w sposób przykładowy charakter zmienności funkcji $\phi_e = \phi_e(\sigma_1)$ oraz $\rho = \rho(\sigma_1)$ dla drobnoziarnistego węgla kamiennego o wilgotności $X_w = 10 \div 15$ i granulacji $d = 0,05 \div 10$ [mm].

Z powyższych ustaleń wynika, że dysponując charakterystykami $\phi_e = \phi_e(\sigma_1)$ oraz $\rho = \rho(\sigma_1)$ można dla zadanej roboczej gęstości ρ_0 materiału ziarnistego, odpowiadającej konkretnym warunkom przeładunku oszacować wartość $\phi_e = \phi_e(\rho_0)$. Przykładowo, wg rys.6 dla $\rho = \rho_0 = 750$ otrzymuje się:

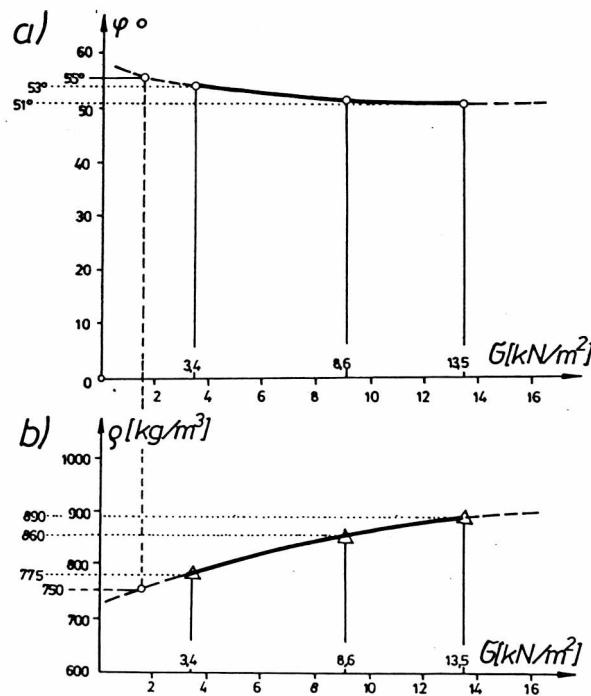
$$\sigma_1 = 1,5; \quad \phi_e = \phi_e(\rho_0) = 55^\circ$$

W tabeli II zestawiono liczbowe oszacowania parametru ϕ_e dla drobno- i średnioziarnistych węgli kamiennych i brunatnych stanowiących najczęściej przedmiot przeładunku wieloczerpakowymi maszynami składowiskowymi.

O wartościach i rozkładzie parć materiału ziarnistego w procesach jego przeładunku decydują nie tylko własności samego materiału, lecz także warunek jaki narzuca na stan naprężenia kontakt materiału ziarnistego z tworzywem, z którego wykonane są elementy układu przeładowniczego.

Tab.II. Zestawienie liczbowych oszacowań efektywnego kąta tarcia wewnętrznego ϕ_e dla drobno- i średnioziarnistego urobku węgla kamiennych i brunatnych w warunkach ich przeładunku na składowiskach

ϕ_e	Charakterystyki własności materiałowych urobku węglowego		
	Rodzaj urobku	Wilgotność [%]	Zawartość popiołu [%]
40°	Węgiel kamienny energetyczny w stanie powietrzno-suchym	do 8	9 ÷ 12
50°	Węgiel kamienny lub koksującym z kilkuprocentową domieszką frakcji pyłowej i proszkowej	10 ÷ 15	do 15
55°	Węgiel kamienny energetyczny, tzw. "niesort" z kilkunastoprocentową zawartością frakcji pyłowej i proszkowej	do 15	do 20
58°	Węgiel brunatny energetyczny bez wtrąceń frakcji pyłowej i domieszek gliny	do 48	do 21
60°	Węgiel kamienny energetyczny z kilkuprocentową zawartością frakcji pyłowej i proszkowej	do 25	do 20
65°	Węgiel brunatny energetyczny z kilkuprocentową zawartością frakcji pyłowej i proszkowej oraz kilkuprocentową zawartością gliny	do 50	do 20
70°	Węgiel kamienny energetyczny z kilkunastoprocentową zawartością frakcji pyłowej i proszkowej	do 50	do 21
74°	Węgiel brunatny z kilkunastoprocentową zawartością frakcji pyłowej i proszkowej oraz kilkunastoprocentową zawartością gliny	50 ÷ 55	do 20



Rys. 6. Przykład charakterystyk określających zmienność efektywnego kąta tarcia wewnętrznego ϕ_e oraz gęstości ρ w funkcji największego naprężenia głównego σ_1 dla drobnoziarnistego węgla kamiennego

Po przyjęciu założenia, że kontakt materiału ziarnistego z tworzywem konstrukcyjnym ma charakter tarciový (z pominięciem adhezji), wówczas nachylenie wektora naprężenia nie może być większe niż określa to współczynnik tarcia spoczynkowego μ_{xs} jednego materiału po drugim. Oznaczając odchylenie wektora naprężenia od normalnej do powierzchni kontaktu przez ϕ_{xs} , można wówczas przyjąć, że:

$$\phi_{xs} \leq \arctan \mu_{xs} \quad (29)$$

Warunek ten przedstawia na płaszczyźnie Mohra pewną prostą ograniczającą możliwe położenia wektora naprężenia (rys. 5). Poślizgowi materiału ziarnistego po sztywnym tworzywie konstrukcyjnym odpowiada pojęcie tzw. kinematycznego współczynnika tarcia zewnętrznego μ_{xk} . Oznaczając odchylenie wektora naprężenia od normalnej do powierzchni kontaktu w warunkach poślizgu przez ϕ_{xk} , otrzymuje się:

$$\phi_{xk} \leq \arctan \mu_{xk} \quad (30)$$

W wyniku badań procesu tarcia różnych materiałów ziarnistych stykających się ze sztywną powierzchnią ścianek wykonanych ze stali konstrukcyjnej wynika, że średnie wartości współczynnika tarcia kinematycznego μ_{xk} stanowią $80 \div 90$ [%] wartości współczynnika tarcia spoczynkowego μ_{xs} . Z dokładnością wystarczającą w zastosowaniach praktycznych można przyjąć założenie o istnieniu przybliżonej relacji:

$$\mu_{xk} = 0,85 * \mu_{xs} \quad (31)$$

W świetle przedstawionej charakterystyki fizyko-mechanicznych właściwości materiałów ziarnistych można postulować, że mechaniczny proces przeładunku tych materiałów na składowiskach będzie w znaczący sposób uzależniony od następującego zbioru cech materiałowych M :

$$M = \left\{ n_p, e(n_p), \psi_A, \alpha(\psi_A), d_m, k_e, k_s, \gamma(\rho), X_w, S_w, c(\rho), \phi(\rho), \phi_e(c, \rho), \phi_{xs}, \phi_{xk} \right\} \quad (32)$$

4. BADANIA ROZPOZNAWCZE MECHANIKI PROCESU PRZEŁADUNKU MATERIAŁÓW ZIARNISTYCH KOŁEM WIELOCZERPAKOWYM Z ODSRODKOWYM WYSYPEM

W celu ustalenia fenomenologicznych aspektów pracy koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysypem oraz sprecyzowania zasad interpretacyjnych dotyczących zagadnień procesowych występujących na styku szybkoobrotowych czerpaków ze zwałem materiału ziarnistego o określonych cechach fizyko-mechanicznych oraz w trakcie odśrodkowego opróżniania tych czerpaków, przeprowadzono cykl badań rozpoznawczych (pilotujących) na specjalnie zbudowanym do tego celu modelowym stanowisku doświadczalnym.

4.1. Stanowisko doświadczalne

Kinematyczno-funkcjonalny schemat modelowego stanowiska doświadczalnego do badań koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysypem przedstawiono na rys.7 [35]. Stanowisko to składa się z następujących głównych zespołów:

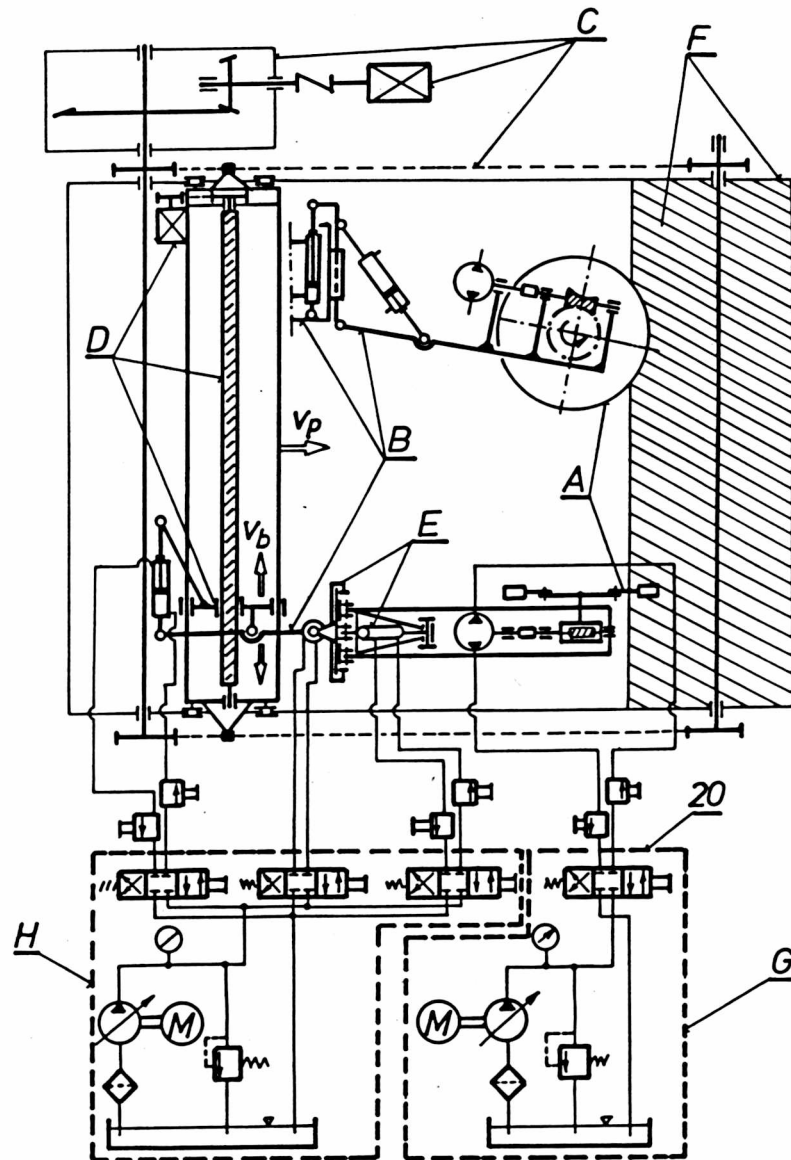
- A - zespół koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysypem,
- B - zespół wysięgnikowy zwodzenia koła wieloczerpakowego w poziomie i w pionie,
- C - zespół przemieszczania układu wysięgnikowego wraz z kołem wieloczerpakowym w kierunku prostopadłym do zwału materiału,
- D - zespół przemieszczania układu wysięgnikowego wraz z kołem wieloczerpakowym w kierunku równoległym do zwału materiału,
- E - zespół podnoszenia - opuszczania układu wysięgnikowego wraz z kołem wieloczerpakowym w kierunku pionowym,
- F - zespół pojemnika skrzyniowego wraz z materiałem ziarnistym,
- G - zespół hydraulicznego zasilania układu napędowego koła wieloczerpakowego,
- H - zespół hydraulicznego zasilania układu zwodzenia wysięgnika w poziomie i w pionie.

Zdjęcie zamieszczone na rys.8 ilustruje widok ogólny stanowiska doświadczalnego.

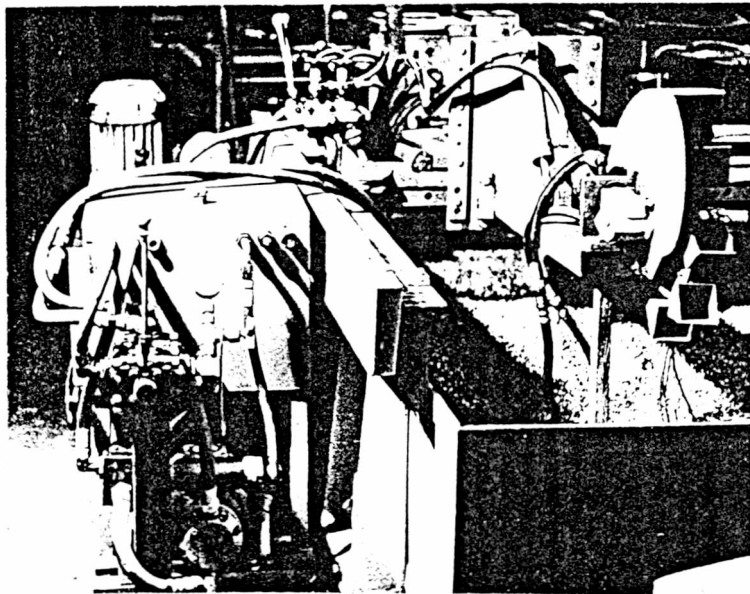
Zespoły napędowe zastosowane w układzie stanowiska zapewniają:

- płynną regulację prędkości przemieszczania $v_p = 0 \div 0,05$ [m/s] układu roboczego w kierunku prostopadłym do zwału;
- płynną regulację prędkości przemieszczania $v_b = 0 \div 0,13$ [m/s] w kierunku równoległym do zwału;
- płynną regulację obrotów $n = 0 \div 100$ [1/min] koła czerpakowego.

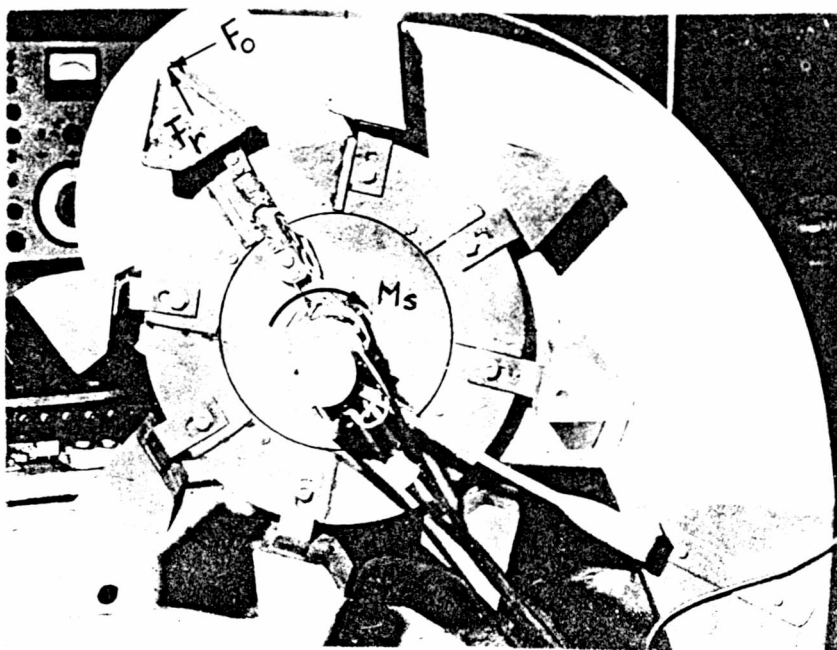
Przesuwne (regulowane) zamocowanie czerpaków umożliwia zarówno zmianę średnicy zewnętrznej $D_0 = 0,48 \div 0,54$ [m] koła wieloczerpakowego, jak też dowolną zmianę liczby $z = 1 \div 12$ czerpaków na tym kole (rys.9).



Rys.7. Schemat modelowego stanowiska doświadczalnego do badań roboczego procesu koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysypem



Rys.8. Widok ogólny stanowiska doświadczalnego

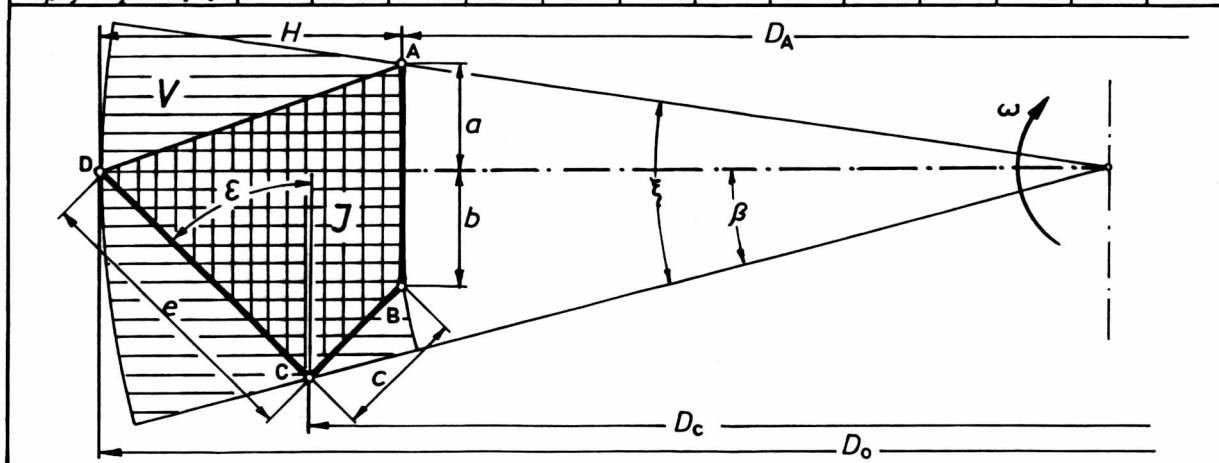


Rys.9. Widok układu do pomiaru składowych sił działających na pojedynczy czerpak oraz układ do pomiaru momentu skręcającego na wale koła czerpakowego

Parametry geometryczne 13-tu kompletów czepaków użytych w programie badań doświadczalnych zestawiono w tabeli III.

Tab.III. Zestawienie geometrycznych parametrów czepaków użytych w programie badań doświadczalnych

OZNACZENIA													
WYMIARY	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
$a \cdot 10^{-3} [m]$	28	28	28	28	28	0	0	0	0	0	0	0	0
$b \cdot 10^{-3} [m]$	32	32	32	32	32	68	54	40	40	44	40	34	30
$c \cdot 10^{-3} [m]$	16	20	34	47	50	26	41	30	59	35	52	74	94
$e \cdot 10^{-3} [m]$	85	84	79	72	70	110	93	90	65	76	76	76	76
$H \cdot 10^{-3} [m]$	80	80	80	80	80	104	104	104	104	86	104	123	142
$D_0 \cdot 10^{-3} [m]$	534	534	534	534	534	516	516	516	516	516	516	516	516
$D_A \cdot 10^{-3} [m]$	374	374	374	374	374	308	308	308	308	344	308	270	232
$D_c \cdot 10^{-3} [m]$	386	388	402	417	420	320	358	378	416	400	400	400	400
$\varepsilon [rad]$	0,998	0,960	0,785	0,610	0,572	0,785	0,785	0,873	0,698	0,785	0,785	0,785	0,785
$\beta [rad]$	0,083	0,082	0,080	0,077	0,076	0,436	0,349	0,262	0,262	0,262	0,262	0,262	0,262
$\xi [rad]$	0,158	0,157	0,155	0,152	0,151	0,436	0,349	0,262	0,262	0,262	0,262	0,262	0,262
$\lambda = D_A / D_0 [-]$	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,597	0,597	0,597	0,597	0,667	0,597	0,523	0,450
$i = D_c / (\lambda \cdot D_0) [-]$	1,033	1,038	1,075	1,116	1,124	1,039	1,162	1,227	1,350	1,162	1,298	1,482	1,723
$k_p = \beta / \xi [-]$	0,525	0,525	0,516	0,507	0,503	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

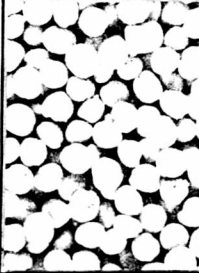


W toku badań użyto trzech rodzajów materiałów ziarnistych:

1. granulāt polistyrenu, bezkohezyjny;
2. żwir sortowany, bezkohezyjny;
3. miął węgla kamiennego, kohezyjny.

Charakterystyczne własności tych materiałów zestawiono w tabeli IV.

Tab.IV. Zestawienie parametrów charakteryzujących własności materiałów ziarnistych użytych w programie badań doświadczalnych

Rodzaj materiału ziarnistego		Gęstość właściwa ρ [kg/m ³]	Skład granulomistr. d [m] · 10 ⁻³	Wilgotność X_w [%]	Efektywny kąt tarcia wewnętrz. ϕ [°]	Kąt tarcia zewnętrz. statyczny ϕ_{xs} [°] kinemat. ϕ_{kk} [°]	
Granulat polistyrenu		700,0	2 ÷ 5	-	25	19,3	17,0
Żwir sortowany		1400	10 ÷ 25	3 ÷ 5	34	31	28
Miat węglowy (kohezyny)		750 ÷ 900 (wg. rys. 6b)	0,05 ÷ 10	10 ÷ 15	50 ÷ 53 (wg. rys. 5)	22	19

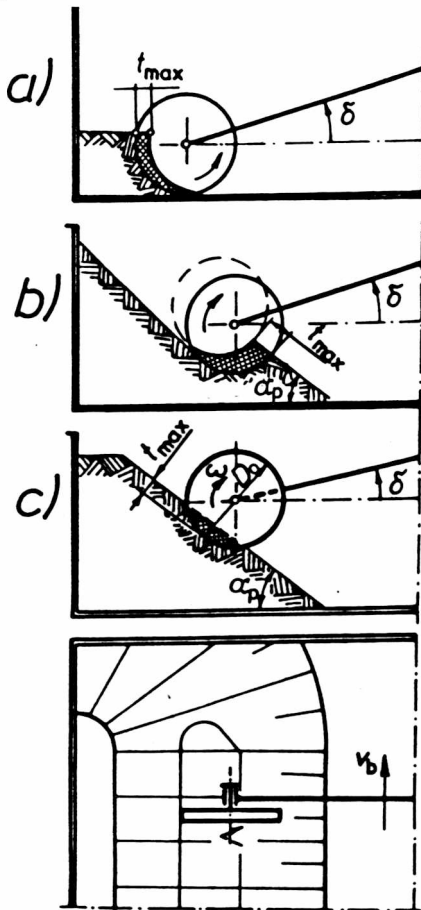
Kontrolno-pomiarowa część stanowiska obejmuje (rys. 9):

- układ tensometryczny mierzący za pomocą złącza obrotowego zmianę momentu skręcającego M_s [N*m] na wale koła czerpakowego;
- obrotomierz mierzący liczbę obrotów koła czerpakowego;
- układ tensometryczny mierzący składową obwodową F_o [N], promieniową F_r [N] i boczną F_b [N] wypadkowej siły działającej na czerpak pomiarowy;
- układ tensometryczny mierzący zmianę momentu gnącego M_g [N*m] w wysięgniku stanowiącym podwieszenie koła czerpakowego.

Rejestrowane na nośniku magnetycznym sygnały po wprowadzeniu za pośrednictwem przetwornika analogowo-cyfrowego do mikrokomputera

stanowiły bazę do dalszej obróbki statystycznej.

Wydajność efektywną (rzeczywistą) Q_e [m^3/s] roboczego procesu koła czerpakowego dla określonych warunków jego geometrii i kinematyki, mierzono pośrednio poprzez pomiar efektywnego czasu t_e [s] pracy koła czerpakowego oraz objętości V_e [m^3] przeładowanego w tym czasie materiału; przeładowywany materiał był wychwytywany do rękawa podwieszonego pod zsuwnią zrzutową:



Rys.10. Oznaczenie technologicznych parametrów pracy koła wieloczerpakowego

$$Q_e = \frac{1}{t_e} * V_e \quad (33)$$

Oznaczenie parametrów technologicznych pracy koła czerpakowego w przyźmie materiału ziarnistego przedstawia rys.10. W celu kinematograficznej i fotograficznej analizy ruchu cząstek w cyklu załadowniczym koła wieloczerpakowego z wysypem odśrodkowym, zastosowano kamerę do zdjęć szybkich (typ HYCAM - 500 klatek/s). Zastosowanie kontrastującego ekranu z naniesioną skalą kątową, której biegun umieszczono w osi koła czerpakowego pokrywającej się z osią optyczną obiektywu kamery, umożliwiło rejestrację badanego

procesu w polu obserwacji obejmującym wszystkie istotne fazy jego realizacji podczas kołowego ruchu czerpaka pomiarowego z przezroczystą boczną ścianką.

4.2. Eksperymentalne badania rozpoznawcze

Zbiór czerpaków zestawionych w tabeli III umożliwia realizację następujących pięciu serii doświadczalnych, dających

pogląd o charakterze wpływu na efektywność roboczego procesu koła wieloczerpakowego (wydajność i energochłonność ładowania) wyróżnionego zbioru parametrów geometrycznych D_0 , H , ε , ξ oraz liczby czerpaków z i prędkości katowej koła ω :

- seria I: $\langle D_0, \varepsilon, \xi, z, \omega \rangle = \text{const}$; zmienny parametr H
- seria II: $\langle D_0, H, \xi, z, \omega \rangle = \text{const}$; zmienny parametr ε
- seria III: $\langle D_0, H, \varepsilon, z, \omega \rangle = \text{const}$; zmienny parametr ξ
- seria IV: $\langle D_0, H, \varepsilon, \xi, \omega \rangle = \text{const}$; zmienny parametr z
- seria V: $\langle D_0, H, \varepsilon, \xi, z \rangle = \text{const}$; zmienny parametr ω

Wyniki szczegółowe dotyczące powyższych serii doświadczalnych przedstawiono w [37], [38], [39] oraz w Załączniku. W rozpatrywanym punkcie omówiono tylko główne, jakościowe rezultaty przeprowadzonych badań pilotujących.

Efekty zaobserwowane w toku eksperymentów rozpoznawczych prowadzą do wniosku, że w procesie roboczym szybkoobrotowego koła czerpakowego należy oddzielnie rozpatrywać:

- fazę napełniania czerpaków (współdziałanie czerpaków ze zwałem materiału ziarnistego);
- fazę podnoszenia zaczerpniętych porcji materiału w kole czerpakowym;
- fazę odśrodkowego wysypu materiału ziarnistego z czerpaków w ich ruchu kołowym;
- fazę rzutu ukośnego pojedynczych ziaren oraz grup ziaren w strefę kosza zsypowego.

Na rys.11 przedstawiono model jakościowy procesu napełniania czerpaków materiałem ziarnistym uformowanym w kształcie pryzmy nachylonej do poziomu pod kątem naturalnego stoku α_p (rys.10).

Z punktu widzenia oceny efektywności procesu zaczerpywania materiału ziarnistego pojedynczymi czerpakami istotna jest znajomość współczynnika napełnienia k_n :

$$k_n = \frac{Q_e}{Q_t} = \frac{n \cdot v_e}{v_t} \quad (34)$$

gdzie:

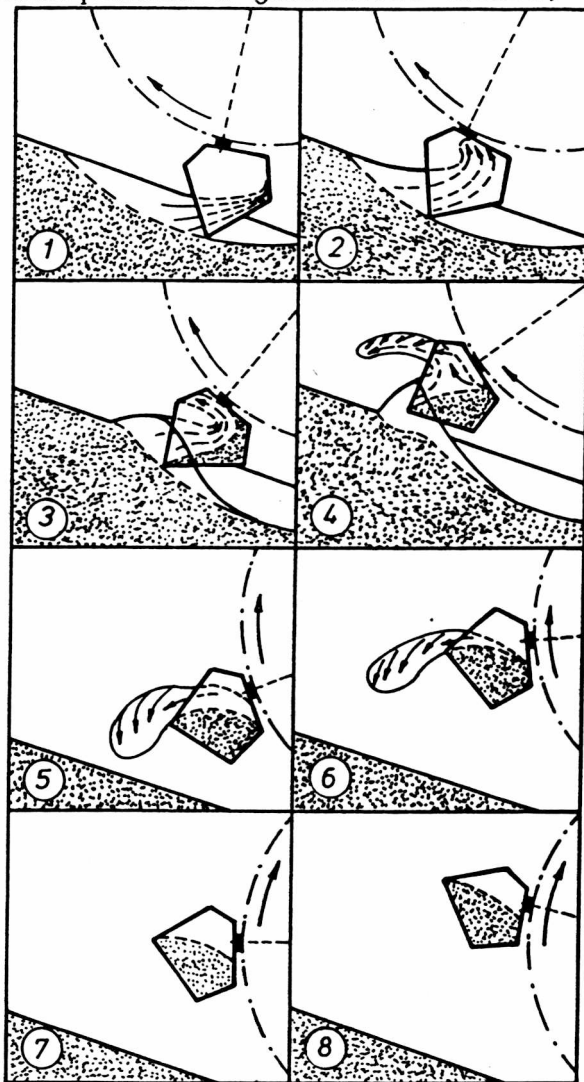
$Q_e = n_w \cdot v_e$ - wydajność efektywna (techniczna) ładowania, $[m^3/s]$;

$Q_t = n_w \cdot v_t$ - wydajność teoretyczna (potencjał przeładowniczy) koła czerpakowego, $[m^3/s]$;

V_e - efektywna (rzeczywista) objętość materiału ziarnistego zaczerpnięta pojedynczym czerpakiem w trakcie jednego obrotu koła czerpakowego, $[m^3]$;

V_t - objętość teoretyczna (obliczeniowa) pojedynczego czerpaka, $[m^3]$;

n_w - liczba wysypów realizowanych przez koło czerpakowe w jednostce czasu, $[1/s]$.



Rys.11. Model jakościowy procesu napełniania czerpaków w szybko-obrotowym kole czerpakowym z odśrodkowym wysypem.

Eksperymentalne badania pilotujące odniesione do wskaźnika jakości procesu k_n wg (34) wykazały, że spośród zbioru parametrów $\langle D_0, H, \varepsilon, \xi, \omega, t_{max} \rangle$ dla ustalonej liczby czerpaków $z = 8 \div 12$ uzasadnione jest poszukiwanie związku korelacyjnego typu:

$$k_n = k_n(k_t', \varepsilon, k_\omega) \quad (35)$$

gdzie:

k_t' - współczynnik grubości zaczerpywanego wióra,

$$k_t' = \frac{t_{\max}}{H}, \quad (36)$$

k_ω - współczynnik prędkości kątowej koła czerpakowego,

$$k_\omega = \frac{\omega}{\omega_k} = v * \sqrt{\frac{2}{D_0 * g}} \quad (37)$$

ω_k - prędkość krytyczna koła czerpakowego, przy której przyspieszenie odśrodkowe działające na cząstkę położoną w odległości $0,5 * D_0$ od środka koła czerpakowego jest równe przyspieszeniu ziemskiemu

$$\omega_k = \sqrt{\frac{2 * g}{D_0}} \quad (38)$$

v - prędkość obwodowa koła czerpakowego, [m/s].

Faza podnoszenia zaczerpniętych porcji materiału w kole czerpakowym trwa od momentu wyjścia czerpaka ze zwału, praktycznie do momentu zakończenia wysypu materiału z tego czerpaka i można ją zdefiniować wysokością podnoszenia H_p [m] lub w sensie bezwymiarowym tzw. współczynnikiem podnoszenia k_p :

$$H_p = k_p * D_0 \Rightarrow k_p = \frac{H_p}{D_0} \quad (39)$$

Z kinematograficznej analizy roboczego procesu koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem wynika, że procedura szacowania liczbowych wartości współczynnika podnoszenia k_p poza uwzględnieniem geometrycznych i kinematycznych parametrów tego typu koła, winna również uwzględniać warunki technologiczne pracy koła czerpakowego (rys.10).

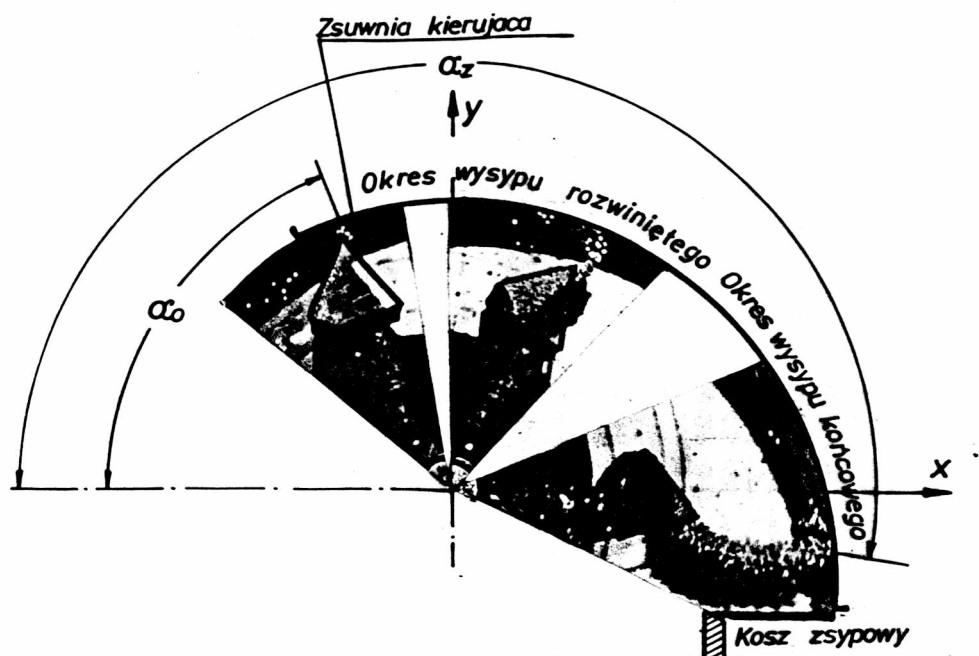
Faza odśrodkowego wysypu materiału ziarnistego z czerpaków jest najbardziej złożona spośród wszystkich wyróżnionych wyżej faz badanego procesu. Dla początku tej fazy - oznaczonej w toku dal-

szej analizy kątem α_0 - istnieje jednoznaczna korelacja pomiędzy rodzajem ładowanego materiału ziarnistego, średnicą koła czerpakowego D_0 oraz jego prędkością kątową ω , względnie obwodową v .

Rozpatrywaną fazę odśrodkowego wysypu można podzielić na okres rozwiniętego wysypu, w którym występuje przemieszczanie ziaren na powierzchni swobodnej materiału w kierunku czołowej, zewnętrznej krawędzi na ścianie górnej czerpaka oraz okres wysypu końcowego, który charakteryzuje się występowaniem poślizgu (ruchem względnym) pojedynczych ziaren i grup ziaren na powierzchni górnej ścianki czerpaka w kierunku jego krawędzi czołowej. Zakończenie fazy wysypu - oznaczone w toku dalszej analizy kątem α_k - można utożsamiać z momentem, w którym ostatnia cząstka materiału zawartego w czerpaku osiągnie krawędź czołową na jego górnej ścianie i zostanie wyrzucona na zewnątrz.

Faza rzutu ukośnego cząstek wyrzuconych z czerpaka w procesie jego odśrodkowego opróżniania rozpoczyna się już w początkowym momencie okresu rozwiniętego wysypu (kąt α_0) i trwa do momentu, w którym ostatnia cząstka wyrzucona z czerpaka (kąt α_k) wpadnie do obszaru kosza zsypowego (układu odbierającego materiał).

Fotogramy obrazujące przebieg fazy wysypu oraz fazy rzutu ukośnego pokazano na rys.12 i w Załączniku.



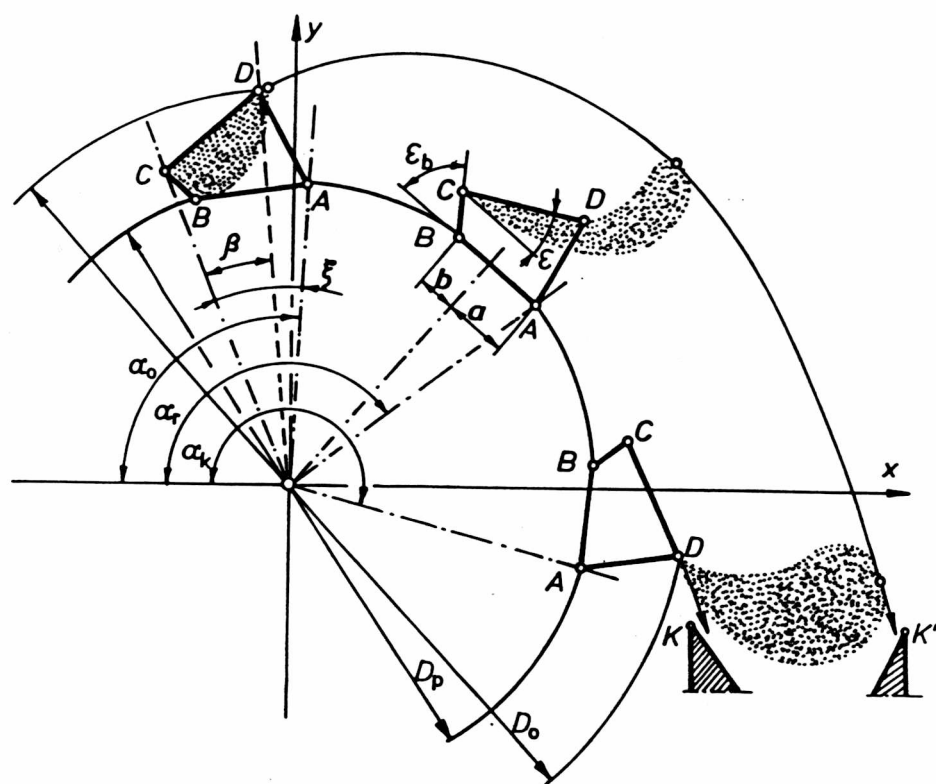
Rys.12. Fotogramy ilustrujące przebieg fazy wysypu oraz fazy rzutu ukośnego

4.3. Zasady interpretacji wyników badań rozpoznawczych

Możliwości zmiany geometrycznych parametrów czerpaków, średnicy i prędkości obrotowej koła czerpakowego oraz rodzaju ładowanego materiału ziarnistego na stanowisku doświadczalnym, umożliwiły wszechstronną obserwację fenomenologicznych aspektów procesu roboczego koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem. Przyjęto, że proces odśrodkowego rozładunku czerpaków w ich ruchu kołowym obejmuje:

- fazę wysypu materiału ziarnistego z czerpaków, przy czym w fazie tej wyróżniono okres rozwiniętego wysypu oraz okres wysypu końcowego,
- fazę rzutu ukośnego materiału ziarnistego i jego ukierunkowany spływ po zsuwni kierującej do węzła zsypowego (układu odbierającego).

Model jakościowy tego procesu w sekwencji dotyczącej odśrodkowego wysypu przedstawiono na rys.13.



Rys.13. Model jakościowy procesu odśrodkowego rozładunku czerpaków w ich ruchu kołowym

W fazie wysypowej okres rozwiniętego wysypu rozpoczyna się przy pewnym kącie obrotu czerpaka $\phi = \alpha_0$, w którym elementarna masa leżąca na powierzchni swobodnej materiału w czerpaku (w strefie jego górnej, czołowej krawędzi, punkt D) osiąga stan równowagi granicznej.

Okres rozwiniętego wysypu trwa do pewnej wartości kąta obrotu czerpaka $\phi = \alpha_r$, przy którym elementarna masa materiału leżąca w otoczeniu najniższego punktu górnej ścianki czerpaka (punkt C) osiągnie stan równowagi granicznej, czyli tak długo, dopóki nie nastąpi odsłonięcie krawędzi BC czerpaka.

Poczynając od współrzędnej katowej α_r następuje okres wysypu końcowego, w którym pozostała reszta materiału w czerpaku przemieszcza się wzdłuż ścianki C-D, w kierunku jego krawędzi czołowej (punkt D).

Koniec fazy wysypowej następuje przy pewnym kącie obrotu czerpaka $\phi = \alpha_k$, w którym elementarna masa materiału ziarnistego przemieszczając się od punktu C ruchem względnym na powierzchni ścianki górnej czerpaka osiąga jego krawędź czołową D.

Poczynając od współrzędnej katowej $\phi = \alpha_k$ ostatnia cząstka wyrzucona z czerpaka winna w rzucie ukośnym trafić poza skrajną krawędź K do kosza zsypowego odpowiednio usytuowanego w stosunku do osi koła czerpakowego.

Usytuowanie zsuwni kierującej w stosunku do osi koła czerpakowego, winno spełniać postulat niezakłóconego, grawitacyjnego spływu w obszar kosza zsypowego wszystkich cząstek wyrzucanych z czerpaków, w ruchu kołowym koła czerpakowego.

Sformułowane wyżej zasady interpretacyjne stanowią podstawę zaproponowanego w dalszym ciągu analitycznego modelu procesu roboczego koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysypem.

5. MODELOWANIE WYRÓZNIONYCH PROCESÓW SKŁADOWYCH W CYKLU ROBOCZYM KOŁA WIELOCZERPAKOWEGO Z ODSRODKOWYM WYSYPEM

5.1. Modelowanie procesu zaczerpywania materiału ziarnistego w kole wieloczerpakowym

Zgodnie z ustaleniami poczynionymi w punkcie 4.2 procedurę modelowania procesu zaczerpywania materiału ziarnistego szybko-bieżnym kołem czepakowym oparto na poszukiwaniu związku korelacyjnego typu (35).

Badania zrealizowano w oparciu o program statyczny, zdeterminowany, selekcyjny, wieloczynnikowy, ortogonalny PS/DS-P: α [60] zakładając, że zmienność współczynnika napełnienia k_n w funkcji rozpatrywanych trzech argumentów k_t , ε , k_ω będzie aproksymowana zależnością regresyjną o postaci:

$$z = b_0 + b_1 \check{x}_1 + b_2 \check{x}_2 + b_3 \check{x}_3 + b_{11} \check{x}_1^2 + b_{22} \check{x}_2^2 + b_{33} \check{x}_3^2 + b_{12} \check{x}_1 \check{x}_2 + b_{13} \check{x}_1 \check{x}_3 + b_{23} \check{x}_2 \check{x}_3. \quad (40)$$

gdzie :

$$k_t = \frac{t_{\max}}{H} - \text{współczynnik zagłębienia czerpaka,}$$

$\check{x}_1, \check{x}_2, \check{x}_3$ - kodowe wartości czynników badanych,

$z = k_n$ - czynnik wynikowy.

Przyjęto niżej podany zakres wartości czynników badanych:

$$x_1 = k_t : 0,638 \div 1,000 [-];$$

$$x_2 = \varepsilon : 0,572 \div 0,998 [\text{rad}];$$

$$x_3 = k_\omega : 0,845 \div 1,355 [-];$$

i określono wartości centralne:

$$x_{10} = \frac{x_{1\max} + x_{1\min}}{2} = \frac{1,000 + 0,638}{2} = 0,819 [-],$$

$$x_{20} = \frac{x_{2\max} + x_{2\min}}{2} = \frac{0,998 + 0,572}{2} = 0,785 [\text{rad}],$$

$$x_{30} = \frac{x_{3\max} + x_{3\min}}{2} = \frac{1,355 + 0,845}{2} = 1,100 [-].$$

Następnie określono jednostki zmienności, przyjmując obowiązującą dla programu PS/DS-P: α wartość $\alpha = 1,215$

($i = 3$, $n_i = 4$, $n_k = 2^3$, $n_0 = 1$, $n_\alpha = 6$, $n = 15$):

$$\Delta x_1 = \frac{x_{1\max} - x_{10}}{\alpha} = \frac{1,000 - 0,819}{1,215} = 0,149 [-],$$

$$\Delta x_2 = \frac{x_{2\max} - x_{20}}{\alpha} = \frac{0,998 - 0,785}{1,215} = 0,175 [\text{rad}],$$

$$\Delta x_3 = \frac{x_{3\max} - x_{30}}{\alpha} = \frac{1,355 - 1,100}{1,215} = 0,210 [-].$$

Pozwoliło to na przyjęcie następujących relacji kodowych:

$$\check{x}_1 = \frac{k_t - 0,819}{0,149} [-],$$

$$\check{x}_2 = \frac{\varepsilon - 0,785}{0,175} [\text{rad}],$$

$$\check{x}_3 = \frac{k_\omega - 1,100}{0,210} [-].$$

Oznacza to jednocześnie przyjęcie kodu:

$$+1: x_1(+1) = x_{10} + \Delta x_1 = 0,819 + 0,149 = 0,968 [-],$$

$$x_2(+1) = x_{20} + \Delta x_2 = 0,785 + 0,175 = 0,960 [\text{rad}],$$

$$x_3(+1) = x_{30} + \Delta x_3 = 1,100 + 0,210 = 1,310 [-];$$

$$-1: x_1(-1) = x_{10} - \Delta x_1 = 0,819 - 0,149 = 0,670 [-],$$

$$x_2(-1) = x_{20} - \Delta x_2 = 0,785 - 0,175 = 0,610 [\text{rad}],$$

$$x_3(-1) = x_{30} - \Delta x_3 = 1,100 - 0,210 = 0,890 [-];$$

$$+\alpha: x_1(+\alpha) = x_{10} + \alpha \cdot \Delta x_1 = 0,819 + 1,215 \cdot 0,149 = 1,000 [-],$$

$$x_2(+\alpha) = x_{20} + \alpha \cdot \Delta x_2 = 0,785 + 1,215 \cdot 0,175 = 0,998 [\text{rad}],$$

$$x_3(+\alpha) = x_{30} + \alpha \cdot \Delta x_3 = 1,100 + 1,215 \cdot 0,210 = 1,355 [-];$$

$$-\alpha: x_1(-\alpha) = x_{10} - \alpha \cdot \Delta x_1 = 0,819 - 1,215 \cdot 0,149 = 0,638 [-],$$

$$x_2(-\alpha) = x_{20} - \alpha \cdot \Delta x_2 = 0,785 - 1,215 \cdot 0,175 = 0,572 [\text{rad}],$$

$$x_3(-\alpha) = x_{30} - \alpha \cdot \Delta x_3 = 1,100 - 1,215 \cdot 0,210 = 0,845 [-].$$

Realizacja programu PS/DS-P: α wymagała wykonania pomiarów dla ośmiu układów w "jadrze" programu ($n_k = 2^i = 2^3 = 8$), jednego w "centrum" programu ($n_0 = 1$) oraz sześciu w "punktach gwiazdnych" ($n_\alpha = 2 * i = 2 * 3 = 6$). Łącznie dało to przy powtarzalności $r = 7$:

$$N = r \cdot (n_k + n_0 + n_\alpha) = 7 \cdot (8 + 1 + 6) = 105 \quad (41)$$

pomiarów dla każdego materiału ziarnistego.

Przykładowe wyniki badań określające średnie wartości czynnika wynikowego $z = \overline{k_n}$ dla mialu węgla podano w tabeli V.

Tab. V. Schemat realizacji programu PS/DS-P: α w zastosowaniu do badań współczynnika k_n maszyny przeładowniczej o rozładunku odśrodkowym.

Czynniki badane	Jedn.	x_k	Δx_k	Kod: ($\alpha = 1,215$)				
				$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
k_t	-	x_1	0,149	0,638	0,670	0,819	0,968	1,000
ε	rad	x_2	0,175	0,572	0,610	0,785	0,960	0,998
k_ω	-	x_3	0,210	0,845	0,890	1,100	1,310	1,355

Lp.	Czynniki badane						Czynnik wynikowy $z = \overline{k_n}$
	Kod			Wartości			
	$\check{x}_1$	$\check{x}_2$	$\check{x}_3$	$x_1 = k_t$	$x_2 = \varepsilon$	$x_3 = k_\omega$	
1	-1	-1	-1	0,670	0,610	0,890	0,738
2	-1	+1	-1	0,670	0,960	0,890	0,866
3	+1	-1	-1	0,968	0,610	0,890	0,677
4	+1	+1	-1	0,968	0,960	0,890	0,972
5	-1	-1	+1	0,670	0,610	1,310	0,446
6	-1	+1	+1	0,670	0,960	1,310	0,652
7	+1	-1	+1	0,968	0,610	1,310	0,086
8	+1	+1	+1	0,968	0,960	1,310	0,500
9	0	0	0	0,819	0,785	1,100	0,636
10	0	$-\alpha$	0	0,819	0,572	1,100	0,423
11	0	$+\alpha$	0	0,819	0,998	1,100	0,800
12	$-\alpha$	0	0	0,638	0,785	1,100	0,722
13	$+\alpha$	0	0	1,000	0,785	1,100	0,546
14	0	0	$-\alpha$	0,819	0,785	0,845	0,858
15	0	0	$+\alpha$	0,819	0,785	1,355	0,382

Obliczono współczynniki funkcji regresji, będącej w tym przypadku funkcją obiektu badań. W tym celu wykorzystano wzory [60]:

$$b_k = \frac{\sum_{k=1}^n \check{x}_{ku} * z_u}{\sum_{k=1}^n \check{x}_{ku}^2}, \quad (42)$$

$$b_{kq} = \frac{\sum_{k=1}^n \check{x}_{ku} * \check{x}_{qu} * z_u}{\sum_{k=1}^n (\check{x}_{ku} * \check{x}_{qu})^2}, \quad (43)$$

$$b_k = \frac{\sum_{k=1}^n \check{x}_{ku} * z_u}{\sum_{k=1}^n (\check{x}'_{ku})^2} \quad (44)$$

przy czym:

$$(\check{x}'_{ku})^2 = \check{x}_{ku}^2 - \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n \check{x}_{ku}^2, \quad (45)$$

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n z_u - \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n \check{x}_{ku} * \sum_{k=1}^i b_{kk}, \quad (46)$$

gdzie u - kolejne układy, k - kolejne czynniki badane, b_0 , b_k , b_{kq} - współczynniki regresji.

W oparciu o powyższe wzory określono współczynniki regresji, które dla mialu węgla wynosiły:

$$\begin{aligned} b_1 &= -0,494697; & b_{11} &= -0,526456; & b_{12} &= 1,797699; \\ b_2 &= 0,075090; & b_{22} &= 0,115625; & b_{13} &= 0,786993; \\ b_3 &= 0,204811; & b_{33} &= -0,134499; & b_{23} &= -1,894558; \\ & & b_0 &= 0,967262. \end{aligned}$$

Otrzymano w ten sposób funkcję obiektu w postaci wielomianu:

$$z = 0,967 - 0,495\check{x}_1 + 0,075\check{x}_2 + 0,205\check{x}_3 - 0,526\check{x}_{11} + 0,116\check{x}_{22} + \\ - 0,134\check{x}_{33} + 1,798\check{x}_1\check{x}_2 + 0,787\check{x}_1\check{x}_3 - 1,895\check{x}_2\check{x}_3.$$

Ocenę istotności współczynników regresji wykonano za pomocą testu t. Wartość wariancji $s^2(z)$ przyjęto na podstawie pomiarów paralelnych - wyniki w Załączniku:

$$s^2(z) = 0,000003666$$

czyli odchylenie standardowe:

$$s(z) = \sqrt{s^2(z)} = 0,001915.$$

Ocenę istotności przeprowadzono sprawdzając nierówność:

$$t = \frac{|b|}{s(b)} > t_{\alpha, f}, \quad (46)$$

gdzie:

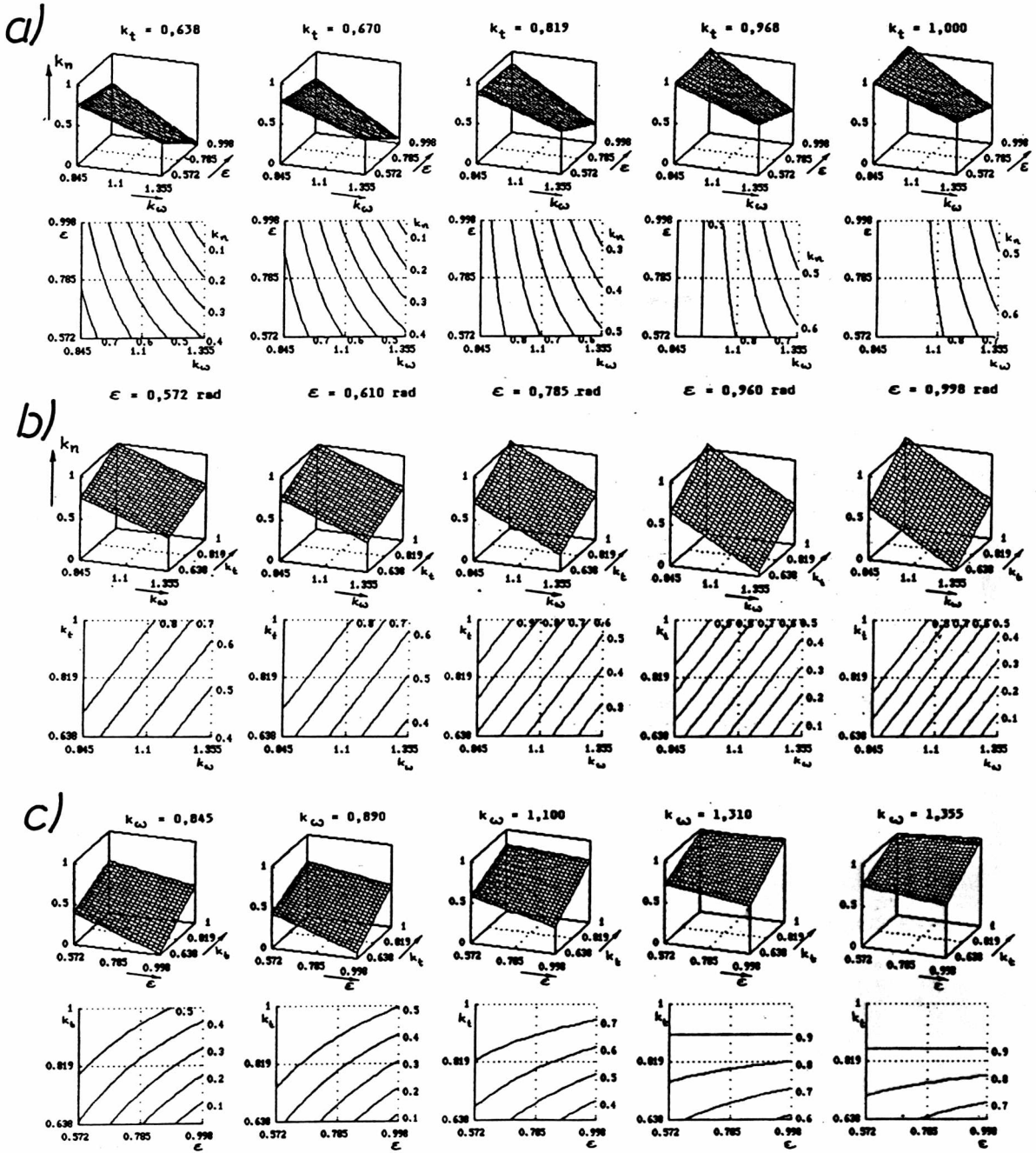
- t - wartość statystyki t Studenta obliczona dla każdego współczynnika regresji,
- b - współczynnik regresji (b_0, b_k, b_{kk}, b_{kq}),
- s(b) - odchylenie standardowe obliczone dla każdego współczynnika regresji,
- $t_{\alpha, f}$ - tabelaryczna wartość statystyki t Studenta,
- α - poziom istotności,
- f - stopnie swobody określone dla liczby pomiarów, na podstawie których określono wariancję $s^2(z)$.

Dla mialu węgla wartości s(b) wynosiły odpowiednio:

$$\begin{aligned} s(b_0) &= 0,5320; & s(b_{11}) &= 0,4323; & s(b_{12}) &= 0,2717; \\ s(b_1) &= 0,7814; & s(b_{22}) &= 0,3128; & s(b_{13}) &= 0,2264; \\ s(b_2) &= 0,5804; & s(b_{33}) &= 0,2177; & s(b_{23}) &= 0,1928; \\ s(b_3) &= 0,5362; \end{aligned}$$

Natomiast wartości obliczeniowe statystyk t Studenta:

$$\begin{aligned} t_0 &= t(b_0) = 1,82; & t_{11} &= t(b_{11}) = -1,22; & t_{12} &= t(b_{12}) = 6,62; \\ t_1 &= t(b_1) = -0,63; & t_{22} &= t(b_{22}) = 0,37; & t_{13} &= t(b_{13}) = 3,48; \\ t_2 &= t(b_2) = 0,13; & t_{33} &= t(b_{33}) = -0,62; & t_{23} &= t(b_{23}) = -9,83; \\ t_3 &= t(b_3) = 0,38. \end{aligned}$$



Rys.14. Wykresy przestrzenne i warstwiczne wielomianu aproksymującego zmienność współczynnika napełnienia k_n dla kohezynego miału węgla

a) $k_n = k_n(k_t = \text{const}; \epsilon; k_\omega)$

b) $k_n = k_n(k_t; \epsilon = \text{const}; k_\omega)$

c) $k_n = k_n(k_t; \epsilon; k_\omega = \text{const})$

Ponieważ wartość $s^2(z)$ określono na podstawie pomiarów, więc liczba stopni swobody wynosi:

$$f = 7 - 1 = 6.$$

Przyjmując arbitralnie określone wartości poziomu istotności α , otrzymano z tablic statystycznych:

$$\alpha = 0,05: t_{0,05-6} = 2,447$$

$$\alpha = 0,10: t_{0,10-6} = 1,943$$

Wykorzystując nierówność (46) stwierdzono, że istotne znaczenie, przy $\alpha = 0,1$ mają jedynie współczynniki b_0 , b_{12} , b_{23} . W rezultacie w przypadku kohezyjnego miału węgla kamiennego, obowiązuje formuła korelacyjna:

$$k_n = 0,90 + 1,195 * k'_t * \varepsilon - 1,013 * \varepsilon * k_\omega \quad (47)$$

Wykresy przestrzenne i warstwiczne wielomianu aproksymującego zmienność współczynnika napełniania k_n dla kohezyjnego miału węglowego przedstawiono na rys.14a, b,c.

5.2. Modelowanie procesu podnoszenia materiału ziarnistego w kole wieloczerpakowym

Proces podnoszenia materiału ziarnistego w kole wieloczerpakowym z odśrodkowym wysypem jest w istotny sposób uzależniony od technologii pracy tego typu koła (rys.10) oraz liczbowych wartości kątów α_0 i α_k określających początek i koniec fazy wysypowej. Ponieważ z przeprowadzonych badań rozpoznawczych wynika, że w warunkach poprawnej realizacji odśrodkowego procesu wysypu ($k_\omega > 1$) faza wysypowa jest praktycznie całościowo realizowana przy $\alpha_0 \geq 90^\circ$ i α_k bliskim 180° , zatem parametr określający wysokość podnoszenia H_p można z dokładnością wystarczającą w zastosowaniach praktycznych zdefiniować następująco (rys.15):

- W kole czepakowym realizującym odśrodkowy proces wysypu, wysokość podnoszenia pojedynczej porcji materiału ziarnistego jest określona odległością pomiędzy środkiem masy wióra S_w zaczerpywanego ze zwału oraz środkiem masy S_c materiału zawartego w czepaku, w jego najwyższym górnym położeniu.

Ponieważ równowagę tę opisuje układ równań (rys.16a)

- w kierunku stycznym do górnej ścianki czerpaka

$$-T - G * \cos \nu + F_0 * \cos \delta_D = 0 \quad (53)$$

- w kierunku normalnym do górnej ścianki czerpaka

$$N + G * \sin \nu - F_0 * \sin \delta_D = 0 \quad (54)$$

gdzie:

F_0 - siła odśrodkowa,

$$F_0 = m * \omega^2 * r_D; \quad r_D = 0,5 * D_0 \quad (55)$$

G - ciężar masy elementarnej m ,

$$G = m * g \quad (56)$$

N - reakcja normalna na górnej ściance czerpaka,

T - opór tarcia statycznego na górnej ściance czerpaka,

$$T = \mu_{xs} * N; \quad \mu_{xs} = \tan \phi_{xs} \quad (57)$$

$$\nu = \alpha_0 + \delta_D - \frac{\pi}{2} \quad (58)$$

więc rugując wartość reakcji normalnej N otrzymuje się:

$$g * (\mu_{xs} * \sin \nu - \cos \nu) + \omega^2 * r_D * (\cos \delta_D - \mu_{xs} * \sin \delta_D) = 0 \quad (59)$$

lub też

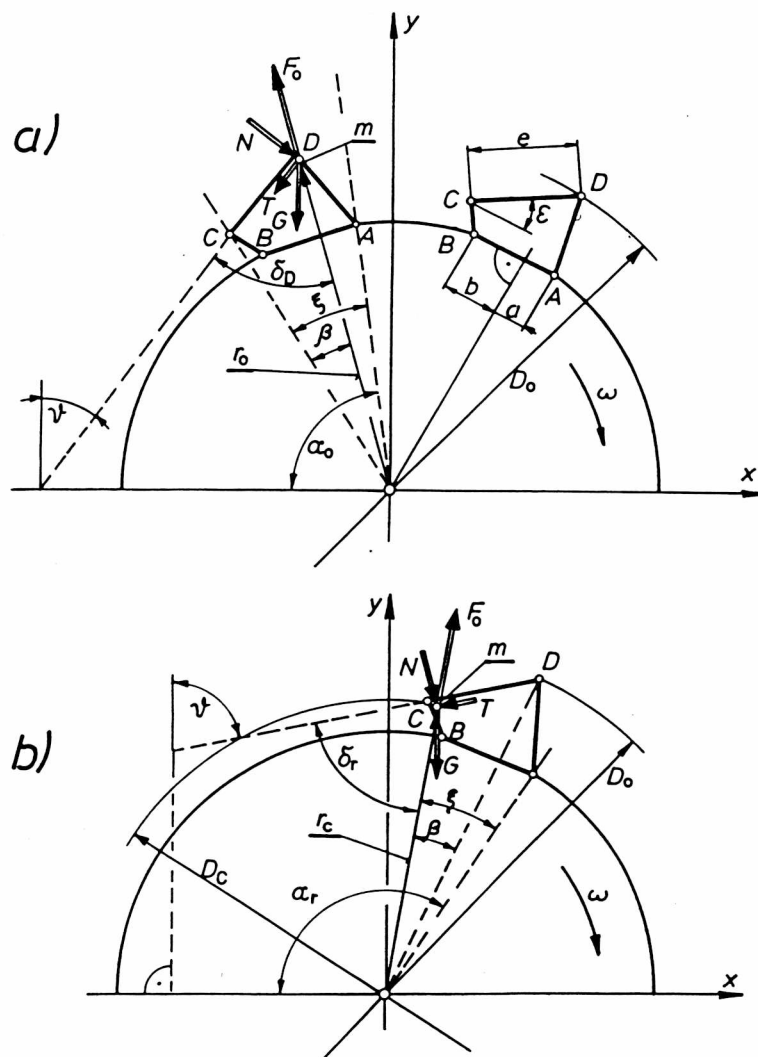
$$\cos(\phi_{xs} + \nu) = \omega^2 * r_D * \cos(\phi_{xs} + \delta_D) * \frac{1}{g} \quad (60)$$

Aby równanie (60) miało sens fizyczny jego prawa strona musi spełniać ograniczenie:

$$\omega^2 * r_D * \cos(\phi_{xs} + \delta_D) * \frac{1}{g} \in \langle -1, 1 \rangle. \quad (61)$$

Z równania (60) wynika następująca zależność na α_0 :

$$\alpha_0 = \arccos \left[\frac{\omega^2 * r_D}{g} * \cos(\phi_{xs} + \delta_D) \right] + \frac{\pi}{2} - (\phi_{xs} + \delta_D) \quad (62)$$



Rys.16. Schemat obciążeń w warunkach granicznej równowagi elementarnej masy materiału ziarnistego w okresie rozwiniętego procesu wysypu

Wartość kąta obrotu $\phi = \alpha_r$, który rozgranicza okres rozwiniętego wysypu od okresu wysypu końcowego, wynika z kolei z warunków granicznej równowagi masy elementarnej m w narożnym punkcie C górnej ścianki czerpaka. Ponieważ równowagę masy m w narożu C czerpaka (rys.16b) opisuje układ równań

$$-\mu_{xs} * N + m * g * \cos(180 - \nu) + m * \omega^2 * r_C * \cos\delta_C = 0 \quad (63)$$

$$N + m * g * \sin(180 - \nu) - m * \omega^2 * r_C * \sin\delta_C = 0 \quad (64)$$

$$\nu = \alpha_r + \delta_C - \frac{\pi}{2}$$

więc stosując identyczne postępowanie jak w przypadku określania liczbowej wartości kąta α_0 wg (62) otrzymuje się:

$$\alpha_r = \arccos \left[\frac{\omega^2 * r_C}{g} * \cos(\phi_{xs} + \delta_C) \right] + \frac{\pi}{2} - (\phi_{xs} + \delta_C) \quad (65)$$

przy czym winna być spełniona relacja

$$\omega^2 * r_C * \cos(\phi_{xs} + \delta_C) * \frac{1}{g} \in \langle -1, 1 \rangle. \quad (66)$$

Kąty δ_C i δ_D występujące w zależnościach (62) i (65) można wyliczyć przy pomocy geometrycznych zależności wynikających z rys. 16a,b.

W oparciu o twierdzenie cosinusów:

$$e^2 = \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_C}{2} \right)^2 - \frac{D_0 * D_C}{2} * \cos\beta, \quad (67)$$

twierdzenie sinusów

$$\frac{\sin\delta_C}{\frac{D_0}{2}} = \frac{\sin\delta_D}{\frac{D_C}{2}} = \frac{\sin\beta}{e} \quad (68)$$

oraz po uwzględnieniu podstawień:

$$i = \frac{D_0 - 2 * H_0}{D_A} = \frac{D_C}{\lambda * D_0} \Rightarrow D_C = i * \lambda * D_0 \quad (69)$$

$$k_{\beta} = \frac{\beta}{\xi} \Rightarrow \beta = k_{\beta} * \xi \quad (70)$$

otrzymuje się:

$$\delta_D = \arcsin \frac{i * \lambda * \sin(k_{\beta} * \xi)}{\sqrt{1 + i * \lambda * [i * \lambda - 2 * \cos(k_{\beta} * \xi)]}} \quad (71)$$

$$\delta_C = \arcsin \frac{\sin(k_{\beta} * \xi)}{\sqrt{1 + i * \lambda * [i * \lambda - 2 * \cos(k_{\beta} * \xi)]}} \quad (72)$$

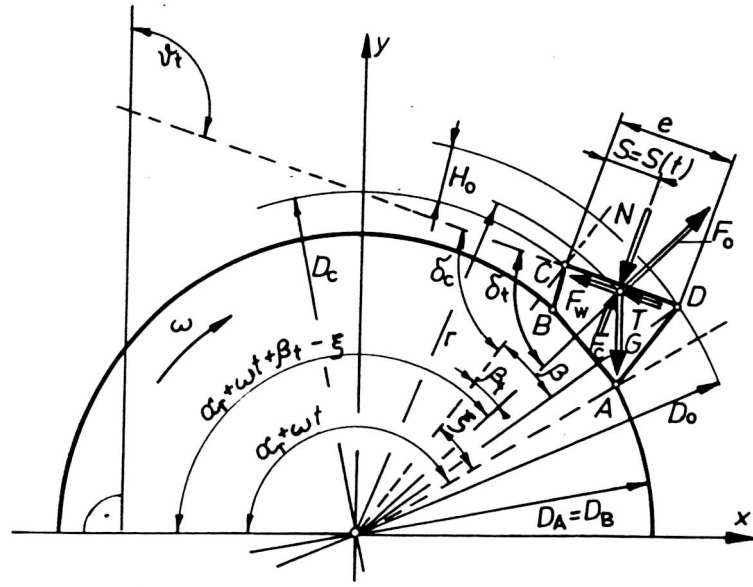
Uwzględniając we wzorach (62) i (63) zależności (49), (69) i (70) otrzymuje się następujące wyrażenia funkcyjne określające współrzędne położenia czerpaka (odniesione do punktu A), w których elementarna masa materiału ziarnistego osiąga stan równowagi granicznej odpowiednio w punktach D i C górnej ścianki czerpaka:

$$\alpha_0 = \arccos \left[k_{\omega}^2 * \cos(\phi_{xs} + \delta_D) \right] + \frac{\pi}{2} - (\phi_{xs} - \delta_D) + \xi * (1 - k_{\beta}) \quad (73)$$

$$\alpha_r = \arccos \left[k_{\omega}^2 * i * \lambda * \cos(\phi_{xs} + \delta_C) \right] + \frac{\pi}{2} - (\phi_{xs} - \delta_C) + \xi \quad (74)$$

5.3.2 Okres końcowego wysypu

Według ustaleń poczynionych w toku eksperymentów rozpoznawczych w rozpatrywanym okresie końcowego wysypu następuje ruch względny mas elementarnych materiału ziarnistego pomiędzy punktami C i D na górnej ścianie czerpaka (rys.17).



Rys.17. Schemat obciążeń działających na elementarną masę materiału ziarnistego w jej ruchu względnym wzdłuż górnej ścianki czepaka

W okresie tym na masę elementarną m działają następujące siły:

- siła odśrodkowa $F_O = m * \omega^2 * r_t$,
- siła Coriolisa $F_C = 2 * m * \omega * \dot{s}(t)$,
- siła ciężkości $G = m * g$,
- siła bezwładności $F_w = m * \ddot{s}(t)$,
- opór tarcia zewnętrznego $T = \mu_{xk} * N$,
- reakcja normalna ścianki N .

Z rys.17 wynikają następujące zależności pomocnicze charakteryzujące ruch względny masy m :

$$\nu_t = \alpha_r + \delta_c + \omega * t - \xi - \frac{\pi}{2} \quad (75)$$

$$\cos \delta_t = \frac{1}{r_t} * \left[i * \lambda * \frac{D_0}{2} * \cos \delta_c + s(t) \right] \quad (76)$$

$$\sin \delta_t = \frac{1}{r_t} * i * \lambda * \frac{D_0}{2} * \sin \delta_c \quad (77)$$

Warunkiem dynamicznej równowagi masy m w każdym momencie jej ruchu względnego na powierzchni ścianki C-D czepaka jest zerowanie się składowych sił normalnych i stycznych do tej powierzchni. W oparciu o tę zasadę otrzymuje się układ równań:

- na kierunku stycznym do ścianki C - D

$$-\mu_{xk} * N + m * \omega^2 * r_t * \cos \delta_t + m * g * \cos(180 - \nu_t) - m * \ddot{s}(t) = 0 \quad (78)$$

- na kierunku normalnym do ścianki C - D

$$-N + 2 * m * \omega * \dot{s}(t) - m * g * \sin(180 - \nu_t) + m * \omega^2 * r_t * \sin \delta_t = 0 \quad (79)$$

Uwzględniając w układzie równań (78) i (79) relacje (75), (76) i (77) oraz rugując N otrzymuje się następujące równanie różniczkowe opisujące ruch względny masy elementarnej materiału ziarnistego na powierzchni C - D czepaka:

$$\ddot{s}(t) + 2 * \mu_{xk} * \omega * \dot{s}(t) - \omega^2 * s(t) = \frac{\omega^2 * i * \lambda * D_0 * \cos(\delta_C + \phi_{xk})}{2 * \cos \phi_{xk}} + \frac{g * \sin(\alpha_r + \delta_C + \omega * t + \phi_{xk} - \xi - \frac{\pi}{2})}{\cos \phi_{xk}} \quad (80)$$

, które można zapisać również następująco:

$$\frac{d^2 s}{d(\omega * t)^2} + 2 * \mu_{xk} * \frac{ds}{d(\omega * t)} - s = \frac{i * \lambda * D_0 * \cos(\delta_C + \phi_{xk})}{2 * \cos \phi_{xk}} - \frac{g * \sin(\alpha_r + \delta_C + \omega * t + \phi_{xk} - \xi - \frac{\pi}{2})}{\omega^2 * \cos \phi_{xk}} \quad (81)$$

Dla warunków początkowych:

$$\phi = \alpha_r \Rightarrow s(t) \Big|_{t=0} = 0 ; \quad \dot{s}(t) \Big|_{t=0} = 0 \quad (82)$$

rozwiązaniem równania (81) jest wyrażenie:

$$s(\omega * t) = a_1 + a_2 * \cos(\omega * t) + a_3 * \sin(\omega * t) + a_4 * \exp(\lambda_1 * \omega * t) + a_5 * \exp(\lambda_2 * \omega * t) \quad (83)$$

, w którym:

$$\lambda_1 = -\mu_{xk} - \sqrt{1 + \mu_{xk}^2} \quad (84)$$

$$\lambda_2 = -\mu_{xk} + \sqrt{1 + \mu_{xk}^2} \quad (85)$$

$$a_1 = -i * \lambda * \frac{D_0 * \cos(\delta_C + \phi_{xk})}{2 * \cos \phi_{xk}} \quad (86)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} * g * \sin(\alpha_r + \delta_C + 2 * \phi_{xk} - \xi) * \frac{1}{\omega^2} \quad (87)$$

$$a_3 = \frac{1}{2} * g * \cos(\alpha_r + \delta_C + 2 * \phi_{xk} - \xi) * \frac{1}{\omega^2} \quad (88)$$

$$a_4 = \frac{a_3 - \lambda_2 * (a_1 + a_2)}{2 * \sqrt{1 + \mu_{xk}^2}} \quad (89)$$

$$a_5 = \frac{\lambda_1 * (a_1 + a_2) - a_3}{2 * \sqrt{1 + \mu_{xk}^2}} \quad (90)$$

Prędkość względna $\dot{s}(t)$ jest określona zależnością:

$$\dot{s}(t) = \frac{ds}{dt} = \omega * \left[-a_2 * \sin(\omega * t) + a_3 * \cos(\omega * t) + a_4 * \lambda_1 * \exp(\lambda_1 * \omega * t) + \right. \\ \left. + a_5 * \lambda_2 * \exp(\lambda_2 * \omega * t) \right]. \quad (91)$$

Czas ruchu względnego t_e masy elementarnej m pomiędzy punktami C - D na górnej ścianie czerpaka o długości e jest określony miejscem zerowym funkcji:

$$s(\omega * t) \Big|_{t=t_e} - e = 0; \quad e = \frac{0,5 * i * \lambda * D_0 * \sin(k_\beta * \xi)}{\sin \delta_D}; \quad (92)$$

δ_D - wg (71).

Tak więc kąt obrotu czerpaka $\phi = \alpha_k$ (odniesiony do punktu A), przy którym ostatnia cząstka materiału ziarnistego jest wyrzu-

cana poza czołową krawędź czerpaka (punkt D) przyjmuje wartość:

$$\alpha_k = \alpha_r + \omega * t_e ; \quad \alpha_r - \text{wg (73)} \quad (93)$$

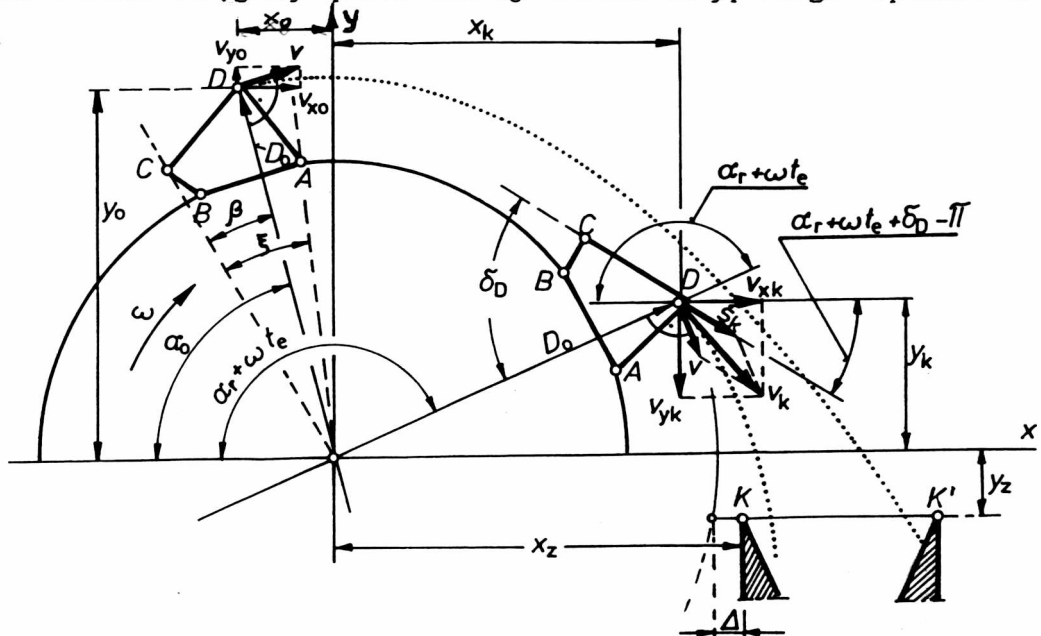
Znając wartość czasu t_e można określić względną prędkość $s_k = s(\omega * t_e)$ ostatniej cząstki wyrzucanej z czerpaka. Otrzymuje się wówczas:

$$s_k = \omega * \left[-a_2 * \sin(\omega * t_e) + a_3 * \cos(\omega * t_e) + a_4 * \lambda_1 * \exp(\lambda_1 * \omega * t_e) + \right. \\ \left. + a_5 * \lambda_2 * \exp(\lambda_2 * \omega * t_e) \right] \quad (94)$$

5.3.3 Faza rzutu ukośnego

Z punktu widzenia racjonalnego kształtowania węzła rozładowego w kole czerpakowym z odśrodkowym wysypem istotna jest znajomość warunków rzutu ukośnego cząstek i brył, które opuszczają czerpaki. Należy brać pod uwagę fakt, że trajektorie rzutu ukośnego grupy cząstek mogą dość znacznie odbiegać od trajektorii wyidealizowanych, szczególnie bardzo drobnych cząstek, które w procesie grawitacyjnego spadania są podatne na opór powietrza.

W przypadku rzutu ukośnego pojedynczych cząstek jak również grup cząstek w kole czerpakowym chodzi głównie o to, aby trajektorie ich ruchu sięgały poza skraj kosza zsykowego (punkt K na rys.18).



Rys.18. Warunki rzutu ukośnego pierwszej i ostatniej cząstki materiału ziarnistego wyrzucanego z czerpaka

Przedstawioną niżej analizę fazy ukośnego rzutu cząstek materiału ziarnistego w kole czerpakowym z odśrodkowym wysypem oparto na założeniu, że jeżeli wymóg trafienia do kosza zsypowego zostanie spełniony przez trajektorie ruchu pierwszej i ostatniej cząstki wyrzucanej z czerpaka, to można mniemać, że zostanie spełniony również przez trajektorie ruchu wszystkich pozostałych cząstek i grup cząstek zawartych w rozpatrywanym czerpaku. Zakładając przeto, że rzut ukośny pierwszej cząstki wyrzucanej z czerpaka następuje przy jego kącie obrotu $\phi = \alpha_0$ wg (73) wówczas współrzędne x_0 , y_0 położenia punktu D można wyrazić wzorami:

$$x_0 = -0,5 * D_0 * \cos[\alpha_0 - \xi * (1 - k_\beta)] \quad (95)$$

$$y_0 = 0,5 * D_0 * \sin[\alpha_0 - \xi * (1 - k_\beta)] \quad (96)$$

Prędkość początkowa cząstki w tych warunkach jest określona wzorami:

$$v_{x0} = \omega * y_0 = k_\beta * \sqrt{\frac{2 * g}{D_0}} * y_0 \quad (97)$$

$$v_{y0} = \omega * x_0 = k_\beta * \sqrt{\frac{2 * g}{D_0}} * x_0 \quad (98)$$

Dla ostatniej cząstki wyrzucanej z czerpaka otrzymuje się

$$x_k = 0,5 * D_0 * \cos[180^\circ - (\alpha_r + \omega * t_e)] \quad (99)$$

$$y_k = 0,5 * D_0 * \sin[180^\circ - (\alpha_r + \omega * t_e)] \quad (100)$$

oraz

$$v_{xk} = \omega * y_k + \dot{s}(t_e) * \cos(\alpha_r + \omega * t_e + \delta_D - \pi) \quad (101)$$

$$v_{yk} = -\omega * x_k - \dot{s}(t_e) * \sin(\alpha_r + \omega * t_e + \delta_D - \pi) \quad (102)$$

W przyjętym układzie współrzędnych $\langle x, y \rangle$ równania trajektorii ruchu rozpatrywanych cząstek przyjmują postać:

- dla pierwszej cząstki wyrzucanej z czerpaka:

$$x = -x_0 + v_{x0} * t \Rightarrow t = \frac{x + x_0}{v_{x0}} \quad (103)$$

$$y = y_0 + v_{y0} * t - \frac{1}{2} * g * t^2 \Rightarrow y(x) = y_0 + v_{y0} * \frac{x + x_0}{v_{x0}} - \frac{1}{2} * g * \left(\frac{x + x_0}{v_{x0}} \right)^2 \quad (104)$$

- dla ostatniej cząstki wyrzucanej z czerpaka:

$$x = x_k + v_{xk} * t \Rightarrow t = \frac{x - x_k}{v_{xk}} \quad (105)$$

$$y = y_k - v_{yk} * t - \frac{1}{2} * g * t^2 \Rightarrow y(x) = y_k - v_{yk} * \frac{x - x_k}{v_{xk}} - \frac{1}{2} * g * \left(\frac{x - x_k}{v_{xk}} \right)^2 \quad (106)$$

W procesie odśrodkowego rozładunku czerpaków prawidłowy zrzut cząstek do kosza zsypowego nastąpi wówczas, gdy spełnione zostaną relacje (rys.18):

- dla pierwszej cząstki wyrzucanej z czerpaka:

$$y_0 + v_{y0} * \frac{x_z + x_0}{v_{x0}} - \frac{1}{2} * g * \left(\frac{x_z + x_0}{v_{x0}} \right)^2 > y_z ; \quad x_z = k_{z(x)} * D_0 \quad (107)$$

- dla ostatniej cząstki wyrzucanej z czerpaka:

$$y_k - v_{yk} * \frac{x_z + x_k}{v_{xk}} - \frac{1}{2} * g * \left(\frac{x_z - x_k}{v_{xk}} \right)^2 > y_z ; \quad x_z = k_{z(y)} * D_0 \quad (108)$$

z jednoczesnym zachowaniem warunku:

$$x_z \geq 0,5 * D_0 * \cos(\arcsin \frac{y_z}{0,5 * D_0}) + \Delta \quad (109)$$

gdzie:

Δ - parametr konstrukcyjny koła czerpakowego, [m].

Z relacji (107) i (108) wynika jednoznaczny wniosek, że znaczący wzrost prędkości kątowej koła czerpakowego będzie jednocześnie powodował silny rozrzut ładowanego urobku. Zjawisku temu można skutecznie zapobiec poprzez zastosowanie odpowiednio wyprofilowanej zsuwni kierującej. Problematyka właściwego kojarzenia zsuwni kierującej z szybkoobrotowym kołem czerpakowym realizującym odśrodkowy wysyp urobku była szczegółowo rozpatrywana w pracy [37].

5.3.4 Weryfikacja doświadczalna analitycznego modelu odśrodkowego wysypu w kole czepakowym

Doświadczalna weryfikacja zaproponowanego analitycznego modelu fazy wysypowej w kole czepakowym z odśrodkowym wysypem polegała na pomiarze kątów $\bar{\alpha}_0$ i $\bar{\alpha}_k$ zarejestrowanych na tle skali katowej dla przyjętej geometrii i określonej kinematyki procesu.

Szczegółowe omówienie przebiegu tych eksperymentów oraz całościowe zestawienie otrzymanych wyników pomiarowych zamieszczono w raporcie [38] i w Załączniku. W tabeli VI przykładowo zestawiono przedziały liczbowe dla zmierzonych wartości kątów $\alpha_0 = \bar{\alpha}_0$ i $\alpha_k = \bar{\alpha}_k$ (traktowanych jako zmienne losowe) oraz obliczone wartości kątów $\alpha_0 = \alpha_{0(\text{obl})}$ i $\alpha_k = \alpha_{k(\text{obl})}$ otrzymane wg wzorów (73), i (74) w odniesieniu do trzech rodzajów materiału ziarnistego (tabela IV) oraz czepaka o kształcie oznaczonym w tabeli III numerem III.

Tab. VI. Zestawienie porównawcze zmierzonych i obliczonych wartości kątów α_0 i α_k charakteryzujących fazę wysypową w kole naczyniowym z odśrodkowym wysypem

rodzaj materiału ziarnistego	ω rad/s	$\alpha_0 = \bar{\alpha}_0$		α_0 (obl) rad	$\alpha_k = \bar{\alpha}_k$		α_k (obl) rad
		granice przedziału ufności			granice przedziału ufności		
		dolna	górna		dolna	górna	
granulat polistyrenu	5,55	1,552	1,674	1,658	2,702	2,852	2,707
	6,78	1,414	1,564	1,471	2,620	2,787	2,761
	7,40	1,250	1,449	1,353	2,573	2,719	2,716
miął węgla kamiennego	5,55	1,477	1,792	1,593	2,939	3,093	2,978
	6,78	1,480	1,665	1,545	2,946	3,110	2,991
	7,40	1,417	1,627	1,517	2,998	3,190	3,007
żwir sortowany	5,55	1,484	1,695	1,609	2,649	2,841	2,798
	6,78	1,456	1,623	1,529	2,800	2,943	2,836
	7,40	1,480	1,634	1,480	2,848	3,019	2,896

W toku statystycznego testowania danych pomiarowych otrzymanych w wyniku przeprowadzonych badań weryfikacyjnych wykazano, że na poziomie ufności wystarczającym w zastosowaniach praktycznych, można mniemać o poprawności oszacowań analitycznych otrzymanych wg formuł (73) i (74) dla kątów α_0 i α_k .

6. MODELOWANIE WYDAJNOŚCI I ENERGOCHŁONNOŚCI PROCESU ŁADOWANIA MATERIAŁÓW ZIARNISTYCH KOŁEM WIELOCZERPAKOWYM Z ODSRODKOWYM WYSYPEM

6.1 Wydajność teoretyczna i efektywna ładowania

Wychodząc z założenia, że układ konstrukcyjny koła czerpakowego jest opisany zbiorem wielkości geometrycznych wg rys.19, wówczas pojemność obliczeniową $I [m^3]$ pojedynczego czerpaka można określić wzorem:

$$I = q \cdot V = q \cdot k_b \cdot H \cdot \frac{\xi \cdot D_0^2 \cdot (1 - \lambda^2)}{8} = q \cdot k_b \cdot \frac{\xi \cdot D_0^3 \cdot (1 - \lambda) \cdot (1 - \lambda^2)}{16} \quad (110)$$

gdzie:

V - objętość wycinka pierścienia o średnicy zewnętrznej D_0 wewnętrznej D_A , szerokości b i kącie środkowym ξ

$$V = b \cdot \frac{\xi \cdot D_0^2 \cdot (1 - \lambda^2)}{8} ; \quad \lambda = \frac{D_A}{D_0} \quad (111)$$

ξ - kąt środkowy czerpaka, [rad];

$$\xi = \frac{2\pi}{z} - \xi_c \quad (112)$$

z - liczba czerpaków,

H - wysokość czerpaka, [m];

$$H = 0,5 \cdot D_0 \cdot (1 - \lambda) \quad (113)$$

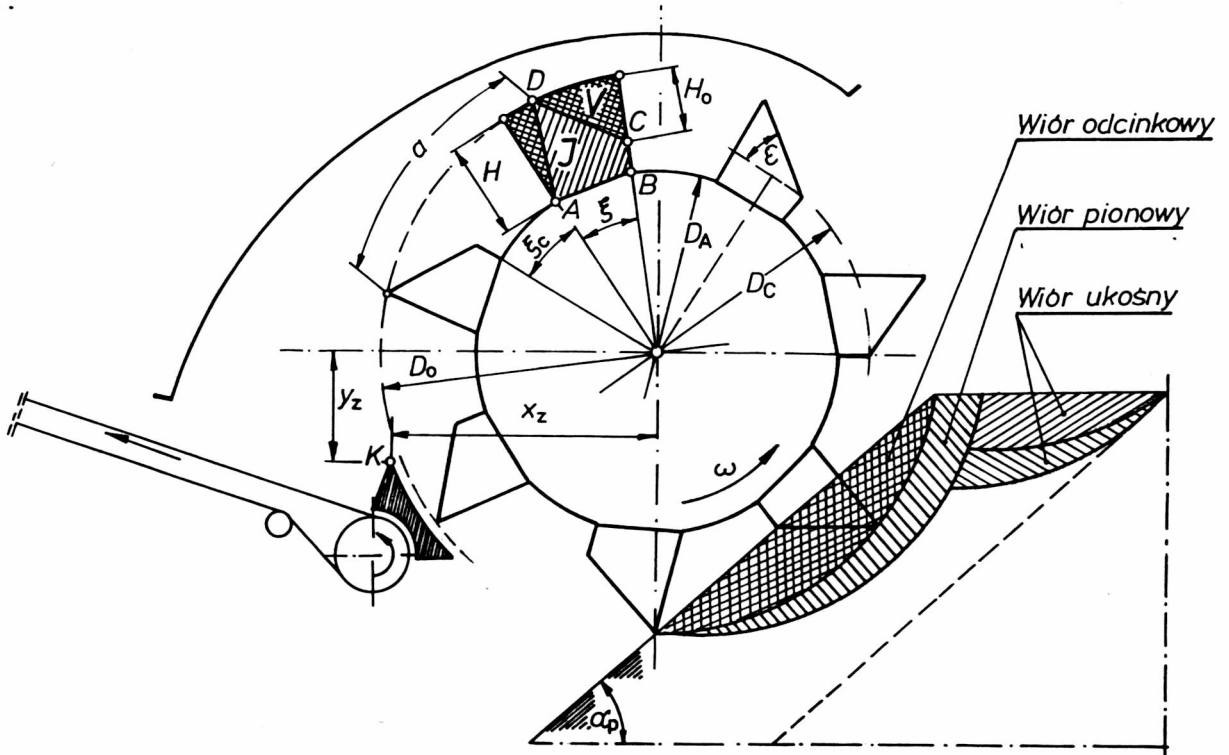
$$k_b = \frac{b}{H} ; \quad b = k_b \cdot H = 0,5 \cdot k_b \cdot D_0 \cdot (1 - \lambda) \quad (114)$$

q - współczynnik geometrycznej formy czerpaka, określający stopień wykorzystania objętości V ;

$$q = \frac{2\lambda * [(1-\lambda) * \sin(k_{\beta} * \xi) + (1-\lambda) * \sin \frac{\xi}{2}]}{\xi * (1-\lambda^2)} \quad (115)$$

k_{β} - wg (70).

Wzór (115) dotyczy geometrii czepaków zestawionych w tabeli III.



Rys.19. Oznaczenie parametrów określających wydajność teoretyczną koła czepakowego z odśrodkowym wysypem

W oparciu o wyjściowy wzór opisujący wydajność teoretyczną koła czepakowego Q_t [m^3/s], [18]:

$$Q_t = I * z * n \quad (116)$$

oraz po uwzględnieniu podstawień:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = k_{\omega} * \frac{\omega_k}{2\pi} = k_{\omega} * \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{2g}{D_0}}; \quad \omega_k - \text{wg (38)} \quad (117)$$

$$k_{\omega} \begin{cases} < 1 - \text{wysyp grawitacyjny} \\ = 1 - \text{wysyp grawitacyjno-odśrodkowy} \\ > 1 - \text{wysyp odśrodkowy} \end{cases} \quad (118)$$

$$\kappa = \frac{\sqrt[3]{I}}{a} = \frac{z \cdot \sqrt[3]{I}}{\pi \cdot D_0} \quad (119)$$

a - podziałka rozstawu czepaków odniesiona do ich czołowych, zewnętrznych krawędzi,

otrzymuje się następujące alternatywne zależności:

$$Q_t = \left[\frac{2\sqrt{2 \cdot g}}{32 \cdot \pi} \cdot q \cdot k_\omega \cdot k_b \cdot z \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{z} - \xi_c \right) \cdot (1 - \lambda) \cdot (1 - \lambda^2) \cdot 2\sqrt{D_0^5} \right] \quad (120)$$

$$\frac{I}{a \cdot v} = \kappa \cdot \sqrt[3]{I^2} \cdot v = k_\omega \cdot \kappa \cdot \sqrt[3]{I^2} \cdot 2\sqrt{\frac{g \cdot D_0}{z}}; \quad v - \text{wg (37)} \quad (121)$$

Wprowadzenie współczynnika κ ma tę zaletę, że łącznie ze współczynnikiem prędkości kątowej k_ω umożliwia określenie wydajności teoretycznej koła czepakowego w funkcji iloczynu potęgowego

$$\sqrt[3]{I^2} \cdot 2\sqrt{D_0^5} \quad [m^{\frac{5}{2}}].$$

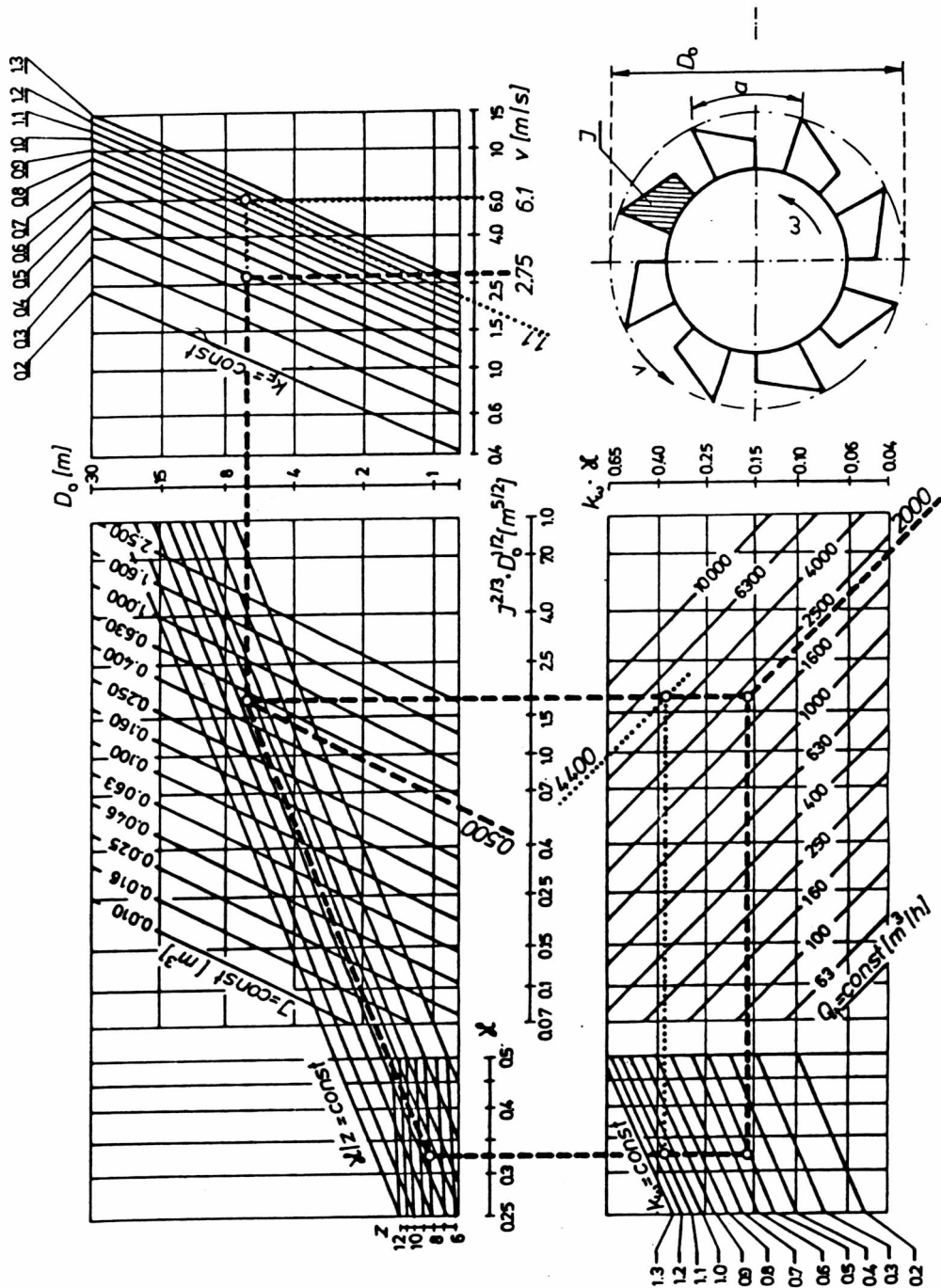
Na rys.20 przedstawiono diagramy, które charakteryzują współzależności zachodzące pomiędzy wielkościami Q_t , D_0 , I , z , v , k_ω , κ , przy czym uwzględniono następujące przedziały zmienności tych wielkości:

$$\begin{aligned} Q_t &= 40 \div 10000 \quad [m^3/h] \\ D_0 &= 1 \div 15 \quad [m] \\ I &= 0,01 \div 2,5 \quad [m^3] \\ z &= 6 \div 12 \\ v &= 0,5 \div 10 \quad [m/s] \\ k_\omega &= 0,2 \div 1,3 \quad [-] \\ \kappa &= 0,25 \div 0,5 \quad [-] \end{aligned}$$

Sposób posługiwania się diagramami przedstawionymi na rys.20 pokazano na przykładzie współzależności występujących pomiędzy głównymi parametrami koła czepakowego o wydajności teoretycznej $Q_t = 2000 \quad [m^3/h]$ pracującego w warunkach wysypu grawitacyjnego ($k_\omega = 0,50$) oraz głównymi parametrami koła czepakowego o wydajności teoretycznej $Q_t = 4400 \quad [m^3/h]$ pracującego w warunkach wysypu odśrodkowego ($k_\omega = 1,1$), przy czym w obu przypadkach zbiór parametrów

$$I = 0,500 \quad [m^3]; \quad z = 8; \quad D_0 = 6,3 \quad [m]; \quad \kappa = 0,32$$

jest taki sam.



Rys. 20. Diagram współzależności występujących pomiędzy parametrami wpływającymi na teoretyczną wydajność koła czerpakowego

Formuły (118) i (119) opisujące teoretyczną wydajność koła czepakowego nie uwzględniają warunków technologicznych jego współpracy ze zwałem materiału ziarnistego. Zakładając, że materiał ziarnisty może być zaczerpywany ze zwału wiórem pionowym, ukośnym i odcinkowym (rys.10), wówczas wydajność efektywna Q_e [m^3/s] koła czepakowego o średnicy D_0 zawieszonoego na wysięgniku o długości L , który jest nachylony do poziomu pod kątem δ można wyrazić zależnością:

$$Q_e = k_s * A_b * v_b ; \quad k_s - \text{wg (12)} \quad (122)$$

gdzie:

A_b - przekrój boczny zaczerpywanego wióra (rys.21)

$$A_b = A_{b0} * \cos \gamma \quad (123)$$

$$A_{b0} = \begin{cases} t_{\max} * h = k_t * k_h * D_0^2 ; \quad k_h = \frac{h}{D_0} ; \quad k_t = \frac{t_{\max}}{D_0} \\ \quad - \text{ dla wióra pionowego i ukośnego} \\ \frac{1}{8} * D_0^2 * (\phi_u - \sin \phi_u) ; \quad \phi_u = 2 * \arccos(1 - 2 * k) \\ \quad - \text{ dla wióra odcinkowego} \end{cases} \quad (124)$$

Przy założeniu, że proces roboczy koła czepakowego ładowarki pracującej systemem ścianowym realizowany jest z pewną stałą prędkością boczną $v_{b0} = \text{const}$, oraz że w przypadku pracy systemem blokowym w zakresie przyjętych kątów manewrowych wysięgnika koła czepakowego ($\gamma_0 = \langle \gamma_{01}, \gamma_{02} \rangle$; rys.21) proces roboczy może być realizowany bądź ze stałą prędkością boczną $v_{b0} = \text{const}$ bądź też z prędkością regulowaną w pewnym przedziale

$$v_{b(\min)} \div v_{b(\max)}$$

wówczas dla określonego kąta nachylenia δ tego wysięgnika otrzymuje się:

ładowanie systemem:

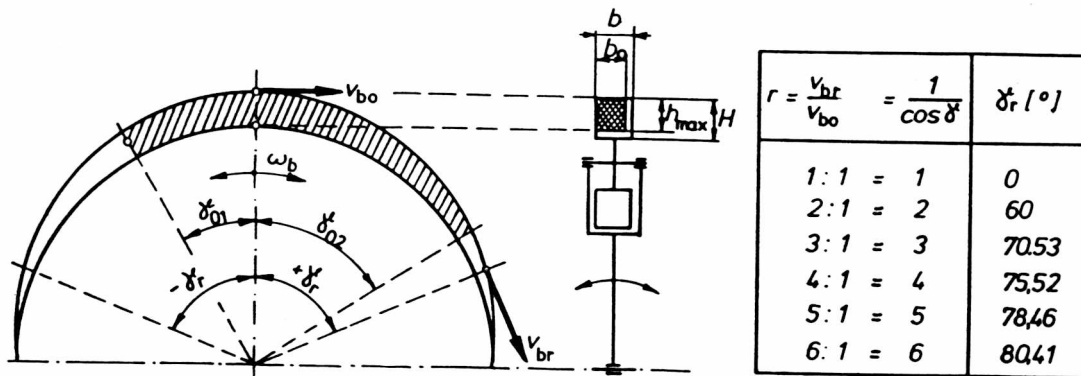
$$v_b = \begin{cases} v_b & - \text{ ścianowym} \\ v_{b0} * \frac{\cos \gamma_r}{\cos \gamma_0} ; \quad \gamma_r = \arccos \frac{1}{r} ; \quad r = \frac{v_{b(\max)}}{v_{b0}} & - \text{ blokowym} \end{cases} \quad (126)$$

Prędkość kątowna bocznego obrotu ω_b wysięgnika koła czepakowego jest w tych warunkach określona następująco (rys.22) :

$$\omega_b = \frac{v_0}{L_h} = \begin{cases} \frac{v_b}{L \cdot \cos \delta + 0,5 \cdot D_0} & \text{- dla wióra pionowego;} \\ \frac{v_b}{L \cdot \cos \delta - 0,5 \cdot D_0 \cdot \cos \phi_u} & \text{- dla wióra ukośnego;} \\ \frac{v_b}{L \cdot \cos \delta + 0,5 \cdot D_0 \cdot \sin \phi_u} & \text{- dla wióra odcinkowego.} \end{cases} \quad (127)$$

W tabeli zamieszczonej na rys.21 zestawiono w sposób przykładowy wartości kątów regulacji γ_r prędkości bocznej koła czepakowego odpowiadające wartościom współczynnika regulacji r z przedziału $r = [1; 6]$.

W świetle powyższych ustaleń wydajność efektywną Q_e koła czepakowego można wyrazić wzorami:



Rys.21. Oznaczenie parametrów określających wydajność efektywną koła czepakowego z odśrodkowym wysypem

$$Q_e = \begin{cases} D_0^2 \cdot k_t \cdot k_h \cdot k_s \cdot \cos \gamma_0 \cdot v_b & \text{- dla wióra pionowego i ukośnego,} \\ D_0^2 \cdot k_s \cdot \frac{\phi_u - \sin \phi_u}{8} \cdot \cos \gamma_0 \cdot v_b & \text{- dla wióra odcinkowego.} \end{cases} \quad (128)$$

Maksymalna wydajność efektywna koła czepakowego z regulowaną prędkością boczną jest osiągana wówczas gdy $\gamma_0 = 0$ i przyjmuje wartość:

$$Q_e(\gamma) \Big|_{\gamma=0} = \begin{cases} D_0^2 * k_t * k_h * k_s * \cos \gamma_r * v_{b0} & \text{- dla wióra pionowego i ukośnego} \end{cases} \quad (130)$$

$$Q_e(\gamma) \Big|_{\gamma=0} = \begin{cases} D_0^2 * k_s * \frac{\phi_u - \sin \phi_u}{8} * \cos \gamma_r * v_{b0} & \text{- dla wióra odcinkowego} \end{cases} \quad (131)$$

W przypadku pracy koła czerpakowego ze stałą prędkością boczną v_{b0} należy przyjmować $\cos \gamma_r = 1$.

Wychodząc w dalszym ciągu z założenia, że relacja występująca pomiędzy wydajnością teoretyczną Q_t i efektywną Q_e koła czerpakowego jest limitowana wartością współczynnika napełnienia k_n wg (34) tzn.:

$$Q_e = k_n * Q_t \quad (132)$$

zatem prędkość boczną v_{b0} zapewniającą poprawną pracę koła czerpakowego w procesie zaczerpywania materiału ziarnistego ze zwalu można wyrazić wzorem:

$$v_{b0} = \frac{k_n * \frac{2\sqrt{2g}}{32\pi} * q * k_\omega * k_b * \xi * z * (1-\lambda) * (1-\lambda^2) * 2\sqrt{D_0}}{k_s * \cos \gamma_r * k_w}, \quad (133)$$

gdzie:

k_w - współczynnik kształtu wióra;

$$k_w = \begin{cases} k_t * k_h & \text{- dla wióra pionowego i ukośnego;} \end{cases} \quad (134)$$

$$k_w = \begin{cases} \frac{1}{8} * (\phi_u - \sin \phi_u) & \text{- dla wióra odcinkowego.} \end{cases} \quad (135)$$

Należy jednakże brać pod uwagę fakt, że poprawna realizacja roboczego procesu koła czerpakowego w zwale materiału ziarnistego wymaga dodatkowo spełnienia następujących ograniczeń:

- maksymalna grubość $t_{\max}$ zaczerpywanego wióra nie może być większa od wysokości H czerpaka;

$$t_{\max} \leq H; \quad k_t \leq 0,5 * (1-\lambda) \quad (136)$$

- maksymalna szerokość $b_{0(\max)}$ zaczerpywanego wióra nie może być większa od szerokości czerpaka b :

$$b_{0(\max)} = \frac{v_{b0}}{n * z} \leq b \Rightarrow v_{b0} \leq k_b * k_\omega * (1-\lambda) * z * \frac{1}{2\pi} * 2\sqrt{\frac{g * D_0}{2}} \quad (137)$$

n - wg (117).

Na diagramach pokazanych na rys.22 przedstawiono charakter współzależności występujących pomiędzy wielkościami

$$\langle Q_e, D_0, t_{\max}, h, v_{b0} \rangle$$

przy czym uwzględniono następujące przedziały tych wielkości:

$$\begin{aligned} Q_e &= 10 \div 10000 \text{ [m}^3/\text{h]}, \\ D_0 &= 2 \div 20 \text{ [m]}, \\ t_{\max} &= 0,1 \div 2 \text{ [m]}, \\ h &= 1 \div 10 \text{ [m]}, \\ k_h &= 0,4 \div 0,75 \text{ [-]}, \\ v_{b0} &= 5 \div 130 \text{ [m/min]}. \end{aligned}$$

Sposób posługiwania się diagramami przedstawionymi na rys.22 (podobnie jak w przypadku diagramów wg rys.20) pokazano na przykładzie współzależności występujących w warunkach procesu przeładunku realizowanego wiórem odcinkowym względnie pionowym lub ukośnym z wydajnością efektywną $Q_e = 2000 \text{ [m}^3/\text{h]}$ oraz $4400 \text{ [m}^3/\text{h]}$ przy czym w obu przypadkach wartości parametrów

$$k_h = 0,50; k_s = 1,00; k_n = 1,00$$

są takie same.

6.2 Energochłonność ładowania

Energochłonność P roboczego procesu koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem (bez uwzględnienia strat wewnętrznych w układzie napędowym koła czerpakowego) można wyrazić w postaci ogólnej następującym wzorem:

$$P = (k_{En} + k_{Ea} + k_{Ep}) * Q_e = k_E * Q_e \quad (138)$$

gdzie:

- k_{En} - jednostkowa praca napełniania czerpaków, $[\text{kJ}/\text{m}^3]$;
- k_{Ea} - jednostkowa praca przyspieszania masy zaczerpywanego materiału od prędkości początkowej $v_0 = 0$ do prędkości obwodowej koła czerpakowego v , $[\text{kJ}/\text{m}^3]$;
- k_{Ep} - jednostkowa praca podnoszenia masy zaczerpywanego materiału, $[\text{kJ}/\text{m}^3]$;
- k_E - całkowita jednostkowa praca ładowania materiału ziarnistego kołem czerpakowym, $[\text{kJ}/\text{m}^3]$.

Spośród wyróżnionych trzech prac jednostkowych składających się na całkowitą jednostkową pracę ładowania k_E

$$k_E = k_{En} + k_{Ea} + k_{Ep} \quad (139)$$

określenie składowych k_{Ea} i k_{Ep} jest możliwe na drodze teoretycznej, bowiem otrzymuje się:

$$k_{Ea} = \rho * v^2 = \rho * (k_{\omega} * \omega_k * \frac{D_0}{2})^2 = \rho * g * \frac{D_0}{2} * k_{\omega}^2 \quad (140)$$

$$k_{Ep} = H_p * \rho g = k_p * D_0 * \rho * g ; k_p - \text{wg (39) i (48)} \quad (141)$$

Natomiast określenie jednostkowej pracy napełniania k_{En} jest zagadnieniem bardziej złożonym, bowiem wielkość ta zależy od oporów wnikania czołowych krawędzi czerpaków w zwał materiału, od oporów tarcia zewnętrznego na styku ładowanego materiału ze ścianami czerpaków jak również oporów wynikających z objętościowej deformacji zaczerpywanego materiału. Oszacowanie miarodajnych, liczbowych wartości dla k_{En} jest możliwe tylko w oparciu o wyniki odpowiednio zaprogramowanych badań eksperymentalnych obejmujących określone grupy materiałów ziarnistych.

Badania eksploatacyjne tego typu były dotychczas w najszerszym zakresie realizowane na ładowarkach i ładowarko-zwałowarkach podczas przeładunku energetycznych węgla kamiennych ($\rho = 0,800 \div 0,900 \text{ [kg/m}^3\text{]}$) oraz węgla brunatnych ($\rho = 0,780 \div 0,870 \text{ [kg/m}^3\text{]}$) [16], [19], [20], [21]. Główne rezultaty tych badań zestawiono w tabeli VII.

Z przedstawionych wyników badań wynika, że w procesie realizacji przeładunku węgla energetycznych w istotny sposób maleje wartość jednostkowej pracy napełniania k_{En} wraz ze wzrostem obliczeniowej pojemności czerpaków $I = \langle 0,25; 0,50; 1,0; 1,6 \rangle \text{ [m}^3\text{]}$. Wniosek ten został również potwierdzony wynikami modelowych badań procesu zaczerpywania miazgu węglowego (tab.IV) przeprowadzonych na stanowisku doświadczalnym. Sposób realizacji tych badań oraz uzyskane wyniki pomiarów szczegółowo omówiono w [38] oraz w Załączniku. Wynikowe rezultaty przeprowadzonych badań odnoszące się do miazgu węgla kamiennego oraz czerpaka o kształcie oznaczonym w tab.III numerem III stanowią uzupełnienie tabeli VII.

Tab. VII. Zestawienie jednostkowych wskaźników energochłonności procesu przeładunku węgla energetycznych

Typ badanej maszyny	J [m ³]	Jednostkowe wskaźniki pracy ładowania [kJ/m ³]				
		k _{E_n}	k _{E_a}	k _{E_p}	k _E	
LZKS 1600.315	1600	122	120	58.6	82.8	
LZKS 1000.315	1000	14.5	9.0	45.0	68.5	
LZKS 500.315	0500	16.3	6.7	35.5	58.5	
LWKS 250.20	0250	18.2	4.7	25.4	48.3	
Badania modelowe na stanowisku doświadczalnym						
Z [-]	ω [rad/s]	J [m ³]	k _{E_n}	k _{E_a}	k _{E_p}	k _E
8	5.55	0.00018	2204	1.67	3.30	27.01
	6.78		22.22	2.49		28.01
	7.40		23.31	2.97		29.58
9	5.55		19.01	1.67		23.98
	6.78		19.27	2.49		25.06
	7.40		20.13	2.97		26.40
10	5.55		18.25	1.67		23.22
	6.78		18.41	2.49		24.20
	7.40		19.02	2.97		25.29
średnio :		20.18	25.86			

W oparciu o dane zestawione w tab. VII można również wnioskować o relacjach, które występują pomiędzy poszczególnymi składowymi całkowitej jednostkowej pracy ładowania materiału ziarnistego kołem wieloczerpakowym.

Wnioski te można najogólniej ująć następująco:

- udział jednostkowej pracy podnoszenia k_{E_p} w całkowitej jednostkowej pracy ładowania k_E jest dominujący (50 ÷ 70 %);
- udział jednostkowej pracy przyspieszania k_{E_a} jest rzędu 10 ÷ 15 %;
- udział jednostkowej pracy napełniania k_{E_n} w całkowitej jednostkowej pracy ładowania k_E jest rzędu 15 ÷ 25 %.

7. OPTIMALIZACJA KÓŁ WIELOCZERPAKOWYCH Z ODŚRODKOWYM WYSYPEM W WARUNKACH PROCESU PRZELADUNKU MATERIAŁÓW ZIARNISTYCH NA SKŁADOWISKACH

7.1 Algebraiczny schemat zadania optymalizacji

W świetle całościowych, dotychczasowych ustaleń proces roboczy koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem można ogólnie scharakteryzować pewnym zbiorem wielkości Ω w skład którego wchodzi podzbiory G , K , T , M

$$\Omega = \{G, K, T, M\},$$

przy czym:

- podzbiór G charakteryzuje mierzalną geometrię koła czerpakowego oraz sposób jego podwieszenia na wysięgniku

$$G = \{D_0, k_b, \lambda, i, z, \xi, k_\beta, \delta, L, k_{z(x)}, k_{z(y)}, \Delta\}; \quad (142)$$

- podzbiór K charakteryzuje sterowalne wymuszenia kinematyczne koła czerpakowego

$$K = \{k_\omega, v_{b0}, r\}; \quad (143)$$

- podzbiór T charakteryzuje sterowalne wymuszenia technologiczne roboczego procesu koła czerpakowego

$$T = \{\gamma_0, k_t, k_h\}; \quad (144)$$

- podzbiór M charakteryzuje mierzalne cechy materiałowe ładowanego materiału ziarnistego

$$M = \{\rho, \mu_{xs}, \mu_{xk}, \alpha_p, k_{En}, k_s\}. \quad (145)$$

Zamierzoną w dalszym ciągu procedurę optymalizacji rozpatrzono w trzech aspektach:

- (i) w aspekcie konstrukcyjnym polegającym na poszukiwaniu koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem, które przy zadanej wydajności teoretycznej ładowania materiału ziarnistego o określonych własnościach fizyko-mechanicznych posiada minimalną średnicę zewnętrzną

$$D_0 = D_{0(\min)} ;$$

(ii) w aspekcie wydajnościowym polegającym na poszukiwaniu koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem, które przy zadanej wydajności teoretycznej ładowania materiału ziarnistego o określonych własnościach fizyko-mechanicznych realizuje ten proces z maksymalną wydajnością efektywną

$$Q_e = Q_{e(max)} ;$$

(iii) w aspekcie energetycznym polegającym na poszukiwaniu koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem, które przy zadanej wydajności teoretycznej ładowania materiału ziarnistego o określonych własnościach fizyko-mechanicznych realizuje ten proces z minimalną jednostkową energochłonnością

$$k_E = k_{E(min)} .$$

7.1.1 Optymalizacja w aspekcie konstrukcyjnym

Algebraiczny schemat zadania optymalizacji koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem - rozpatrywany w aspekcie konstrukcyjnym - został sformułowany następująco:

- Dla zadanej wydajności teoretycznej ładowania $Q_t = \text{const}$ oraz przyjętego zbioru parametrów N

$$N = \left\{ \rho, \mu_{xs}, \mu_{xk}, \alpha_p, k_s, \delta=0, L, r=1, \gamma_0=0, k_h, k_t, k_{z(x)}, k_{z(y)}, \Delta \right\} = \text{const} \quad (146)$$

należy określić takie wartości elementów zbioru argumentów decyzyjnych $X = X_{opt.}$:

$$X = \left\{ x_1=k_b; x_2=\lambda; x_3=i; x_4=z; x_5=\xi; x_6=k_\beta; x_7=k_\omega; x_8=k_t \right\} \quad (147)$$

dla których otrzymuje się:

$$D_0(X_{opt}) = \left| \begin{array}{ll} \sqrt{\frac{Q_t * k_n}{k_t * k_h * k_s * v_{b0}}} = \min & \text{- dla wióra pionowego i ukośnego} \quad (148) \\ \sqrt{\frac{Q_t * k_n}{\frac{1}{8} * k_s * (\phi_u - \sin \phi_u) * v_{b0}}} = \min & \text{- dla wióra odcinkowego} \quad (149) \end{array} \right.$$

$$\phi_u = 2 * \arccos(1 - 2 * k_t).$$

przy ograniczeniach:

- funkcyjnych, równościowych:

$$D_0 = \sqrt[5]{\left[\frac{Q_t}{\frac{\sqrt{2} \cdot g}{32 \cdot \pi} \cdot q \cdot k_\omega \cdot k_b \cdot z \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{z} - \xi_c \right) \cdot (1 - \lambda) \cdot (1 - \lambda^2)} \right]^2}$$

- (startowa wartość D_0 ze wzoru (120)) (150)

$$k_n = b_0 + b_{12} \cdot k_t \cdot \varepsilon - b_{23} \cdot \varepsilon \cdot k_\omega; \quad \text{wg (47)}$$

$$\varepsilon = \arcsin \frac{(1 - \lambda \cdot i) \cdot \sin \delta_D}{i \cdot \lambda \cdot \sin(k_\beta \cdot \xi)}; \quad (151)$$

$$\delta_D - \text{wg (71);}$$

$$v_{b0} = \frac{k_n \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot g}{32 \cdot \pi} \cdot q \cdot k_\omega \cdot k_b \cdot \xi \cdot z \cdot (1 - \lambda) \cdot (1 - \lambda^2) \cdot \sqrt{D_0}}{k_s \cdot k_w}; \quad \text{wg (133)}$$

$$k_w = \begin{cases} k_t \cdot k_h & - \text{dla wióra pionowego} \\ & \text{i ukośnego} \end{cases} \quad \text{wg (134)}$$

$$\frac{1}{8} \cdot (\phi_u - \sin \phi_u) - \text{dla wióra odcinkowego} \quad \text{wg (135)}$$

$$q = \frac{2 \cdot \lambda \cdot [(i - 1) \cdot \sin(k_\beta \cdot \xi) + (1 - \lambda) \cdot \sin \frac{\xi}{2}]}{\xi \cdot (1 - \lambda^2)} \quad \text{wg (115)}$$

- funkcyjnych, nierównościowych:

$$v_{b0} \leq k_b \cdot k_\omega \cdot (1 - \lambda) \cdot z \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot D_0}{2}} \quad \text{wg (137)}$$

$$-1 \leq k_\omega^2 \cdot g \cdot \cos 9(\phi_{xs} + \delta_D) \cdot \frac{1}{g} \leq 1; \quad \delta_D - \text{wg (61)}$$

$$-1 \leq k_\omega^2 \cdot g \cdot \lambda \cdot i \cdot \cos(\phi_{xs} + \delta_C) \cdot \frac{1}{g} \leq 1; \quad \delta_C - \text{wg (66)}$$

$$k_{z(x)} \cdot D_0 \geq 0,5 \cdot D_0 \cdot \cos \left[\arcsin \left(\frac{k_{z(y)}}{0,5} \right) \right] + \Delta \quad \text{wg (109)}$$

$$y_0 + v_{y0} \cdot \frac{k_{z(x)} \cdot D_0 + x_0}{v_{x0}} - \frac{1}{2} \cdot g \cdot \left(\frac{k_{z(x)} \cdot D_0 + x_0}{v_{x0}} \right)^2 > k_{z(y)} \cdot D_0 \quad \text{wg (107)}$$

$$y_k - v_{yk} * \frac{k_{z(x)} * D_0 - x_k}{v_{xk}} - \frac{1}{2} * g * \left(\frac{k_{z(x)} * D_0 + x_k}{v_{xk}} \right)^2 > k_{z(y)} * D_0 \quad \text{wg (108)}$$

- prostych, nierównościowych:

$$\left. \begin{array}{l} x_1' \leq x_1 = k_b \leq x_1'' \\ x_2' \leq x_2 = \lambda \leq x_2'' \\ x_3' \leq x_3 = i \leq x_3'' \\ x_4' \leq x_4 = z \leq x_4'' \\ x_5' \leq x_5 = \xi \leq x_5'' \\ x_6' \leq x_6 = k_\beta \leq x_6'' \\ x_7' \leq x_7 = k_\omega \leq x_7'' \\ x_8' \leq x_8 = k_t \leq x_8'' \end{array} \right\} \quad (152)$$

7.1.2 Optymalizacja w aspekcie wydajnościowym

Algebraiczny schemat zadania optymalizacji koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem - rozpatrywany w aspekcie wydajnościowym - został sformułowany następująco:

- Dla zadanej wydajności teoretycznej ładowania $Q_t = \text{const}$ oraz przyjętego zbioru parametrów N :

$$N = \left\{ \rho, \mu_{xs}, \mu_{xk}, \alpha_p, k_s, \delta=0, L, r=1, \gamma_0=0, k_n, \right. \\ \left. k_t, k_{z(x)}, k_{z(y)}, \Delta, D_0 \right\} = \text{const} \quad (153)$$

należy określić takie wartości elementów zbioru argumentów decyzyjnych $X = X_{\text{opt}}$: X - wg (147), dla których otrzymuje się:

$$\left| Q_e * \frac{1}{k_n} - Q_t \right|^2 = \min \quad (154)$$

gdzie:

$$Q_e = \begin{cases} D_0^2 * k_t * k_h * \cos \gamma_r * v_{b0} & \text{- dla wióra pionowego} \\ & \text{i ukośnego;} \\ D_0^2 * k_s * \frac{\phi_u - \sin \phi_u}{8} * \cos \gamma_r * v_{b0} & \text{- dla wióra odcinkowego.} \end{cases} \quad (155)$$

przy ograniczeniach funkcyjnych równościowych oraz ograniczeniach nierównościowych (funkcyjnych i prostych) takich samych jak w przypadku zadania optymalizacji rozpatrywanego w aspekcie konstrukcyjnym.

7.1.3 Optymalizacja w aspekcie energetycznym

Algebraiczny schemat zadania optymalizacji koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem - rozpatrywany w aspekcie energetycznym - został sformułowany następująco:

- Dla zadanej wydajności teoretycznej koła czerpakowego $Q_t = \text{const}$ oraz przyjętego zbioru parametrów N :

$$N = \left\{ \rho, \mu_{xs}, \mu_{xk}, \alpha_p, k_s, \delta=0, L, r=1, \gamma_0=0, k_n, k_t, k_{z(x)}, k_{z(y)}, \Delta, k_{En} \right\} = \text{const} \quad (156)$$

należy określić takie wartości elementów zbioru argumentów decyzyjnych $X = X_{\text{opt}}$; X - wg (147), dla których otrzymuje się:

$$k_E(X_{\text{opt}}) = \left\{ k_{En} + \rho * g * \frac{D_0}{2} * k_\omega^2 + k_p * D_0 * \rho * g \right\} = \min \quad (157)$$

gdzie:

$$D_0(X) = \begin{cases} \sqrt{\frac{Q_t * k_n}{k_t * k_h * k_s * v_{b0}}} & \text{- dla wióra} \\ & \text{pionowego i ukośnego} \\ \sqrt{\frac{Q_t * k_n}{\frac{1}{8} * k_s * (\phi_u - \sin \phi_u) * v_{b0}}} & \text{- dla wióra} \\ & \text{odcinkowego} \end{cases} \quad (158)$$

$$\phi_u = 2 * \arccos(1 - 2 * k_t) - \text{wg (125)}$$

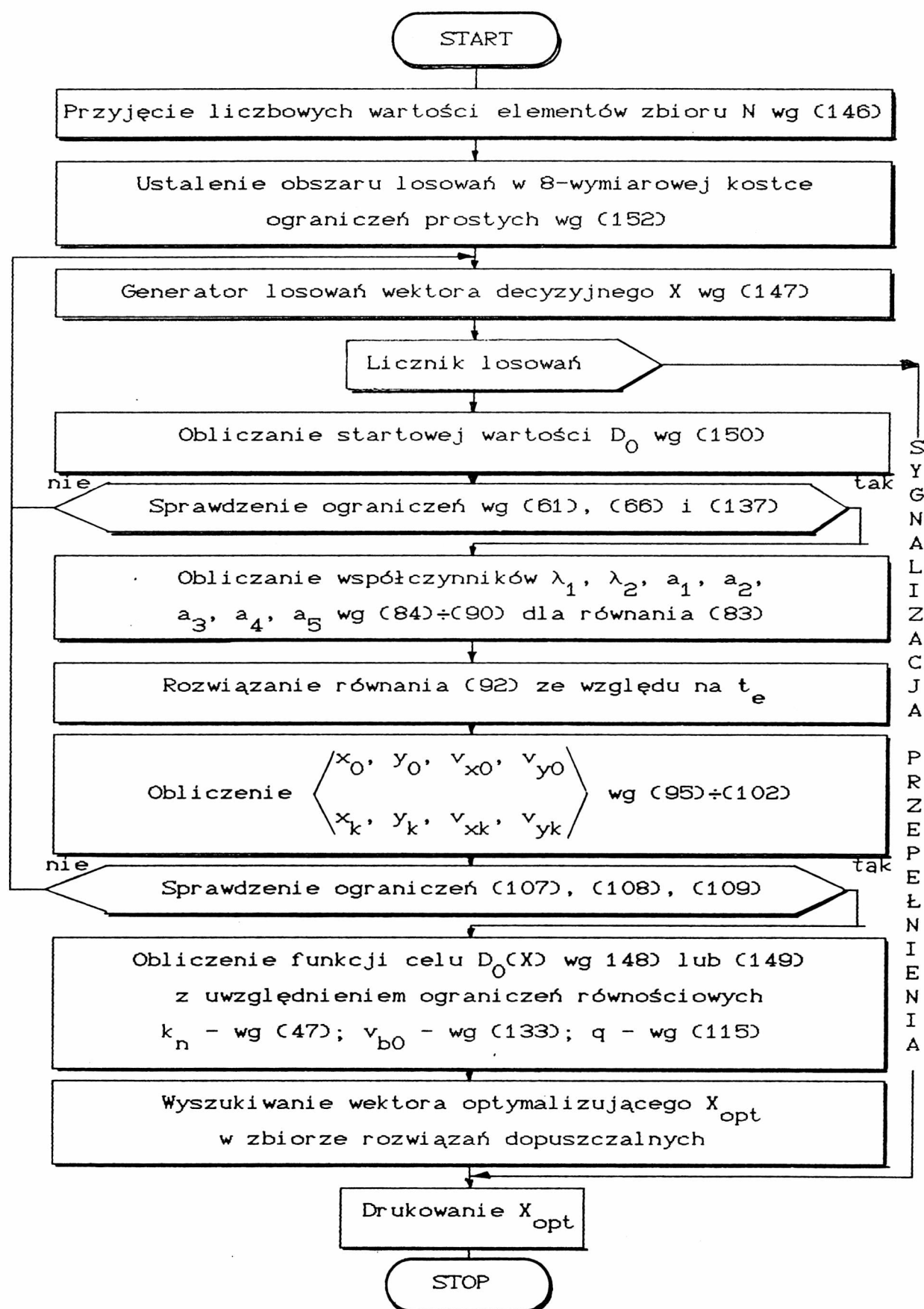
przy spełnieniu ograniczeń funkcyjnych oraz ograniczeń

nierównościowych (funkcyjnych i prostych) takich samych jak w przypadku zadania optymalizacji rozpatrywanego w aspekcie konstrukcyjnym.

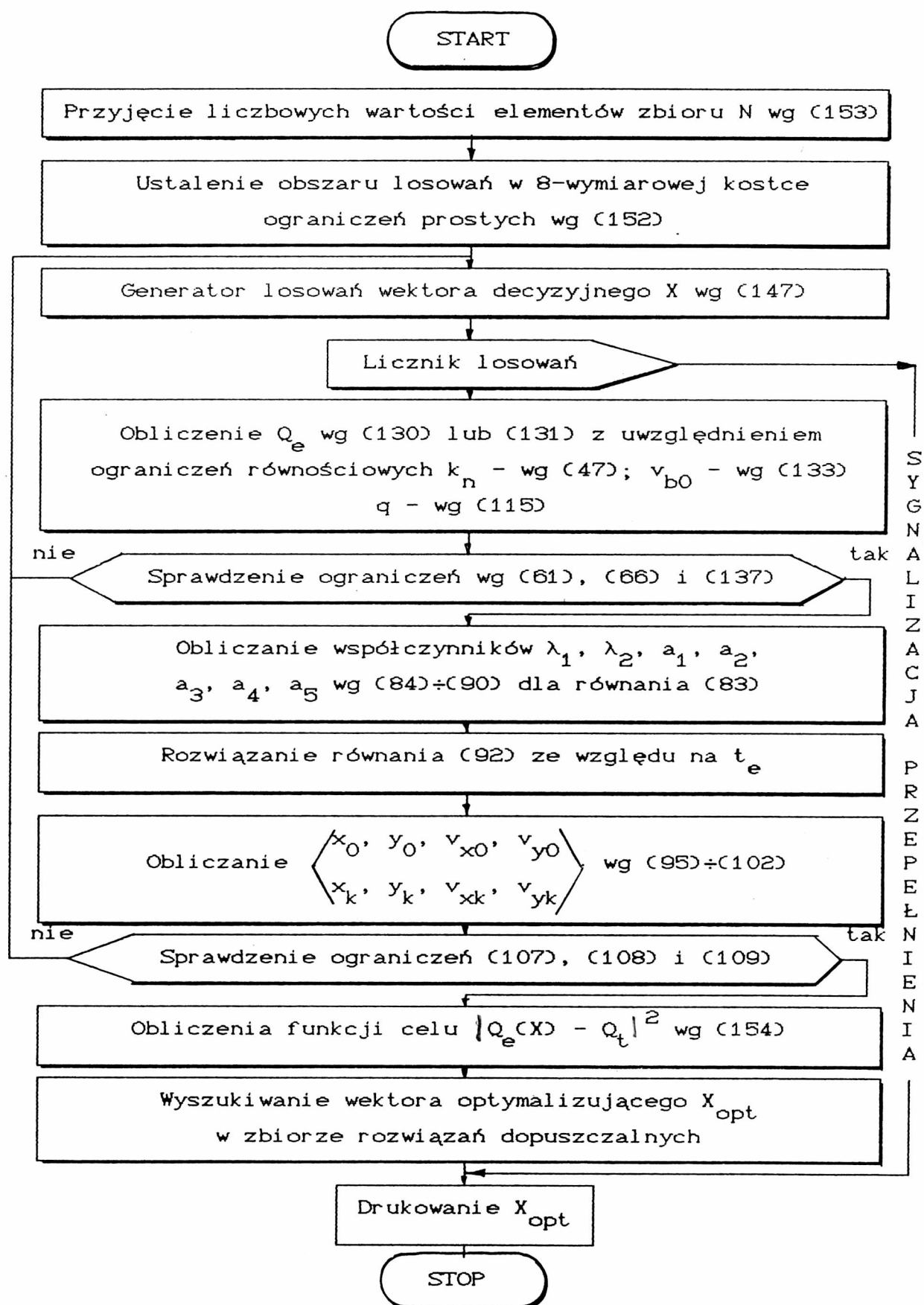
7.2 Algorytmy optymalizacji

Rozpatrywane zagadnienie ekstremalne wyrażone nieliniowymi funkcjami celu w postaci (148), (149), (152) lub (155) i ograniczeniami nierównościami typu funkcyjnego i prostego jest określone w teorii optymalizacji statycznej mianem programowania nieliniowego. Dotychczas nie jest znana żadna ogólna metoda, za pomocą której można byłoby rozwiązać tego typu zadanie w skończonej liczbie kroków. Znane obecnie metody obliczeniowe wielowymiarowej optymalizacji z ograniczeniami mają charakter iteracyjny (polegają na budowie zdeterminowanych ciągów rozwiązań zbieżnych do rozwiązania optymalnego) lub też są typu statycznego (elementy zbioru dopuszczalnego są generowane w sposób losowy).

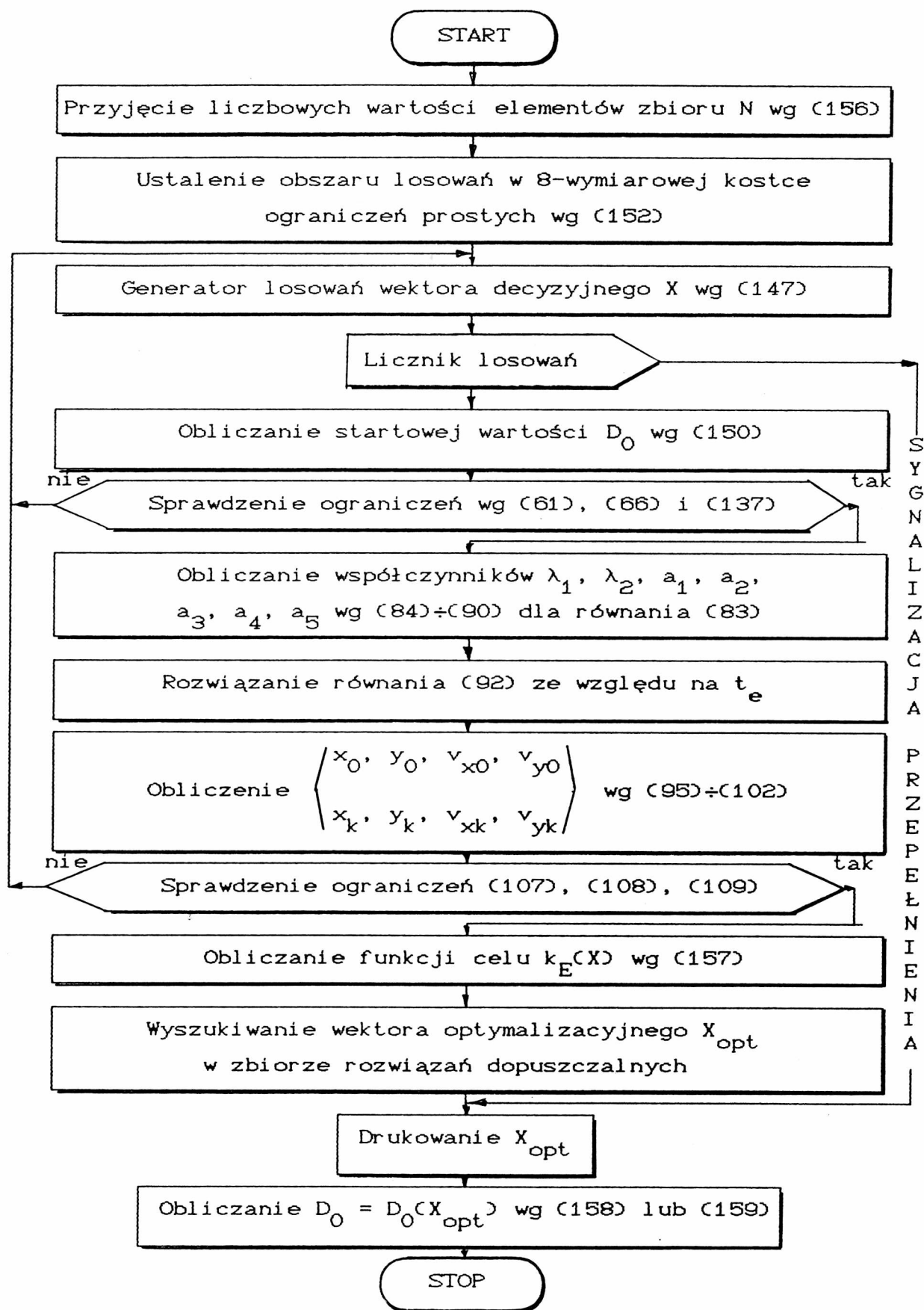
Uwzględniając mieszany charakter rozpatrywanego problemu optymalizacyjnego oraz dokonując analizy zalet i wad różnego typu numerycznych procedur optymalizacyjnych zalecanych do rozwiązywania tej klasy problemów zdecydowano się na metodę Monte-Carlo. Metoda ta polega na losowaniu punktów z przestrzeni ograniczeń i jej główną zaletą jest to, że nie stawia silnych wymagań co do funkcji celu i ograniczeń (nie muszą być ciągłe i różniczkowalne), ponadto w metodzie tej brak jest kumulacji błędów. Schemat blokowy algorytmu optymalizacji koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem realizowanej w aspekcie konstrukcyjnym przedstawiono na rys.23, realizowanej w aspekcie wydajnościowym na rys.24, natomiast realizowanej w aspekcie energetycznym na rys.25.



Rys.23. Schemat blokowy algorytmu optymalizacji koła
 czerpakowego z odśrodkowym wysypem realizowanej
 w aspekcie konstrukcyjnym



Rys.24. Schemat blokowy algorytmu optymalizacji koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem realizowanej w aspekcie wydajnościowym



Rys.25. Schemat blokowy algorytmu optymalizacji koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem realizowanej w aspekcie energetycznym

7.3. Przykładowe wyniki optymalizacji

Przykład realizacyjny rozpatrywanego zagadnienia optymalizacji odniesiono do koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem o wydajności teoretycznej $Q_t = 2000 \text{ [m}^3/\text{h]}$ w warunkach przeładunku miału węgla kamiennego o własnościach fizyko-mechanicznych scharakteryzowanych w tab.IV.

- W przypadku zadania optymalizacji sformułowanego w aspekcie konstrukcyjnym (wg algorytmu o schemacie blokowym przedstawionym na rys.23) dla zbioru parametrów N :

$$N = \left\{ \rho=800; \mu_{xs}=0,40; \mu_{xk}=0,34; \alpha_p=0,628; k_s=1,1; \right.$$

$$\delta=0; L=31,5; r=1; \gamma_0=0; k_h=0,5;$$

$$\left. \begin{matrix} k_{z(x)}=1; k_{z(y)}=0; \Delta=0,1 \end{matrix} \right\} = \text{const},$$

oraz dla następujących ograniczeń prostych, dotyczących zbioru argumentów decyzyjnych X :

$$0,90 \leq x_1 = k_b \leq 1,10$$

$$0,40 \leq x_2 = \lambda \leq 0,80$$

$$1,00 \leq x_3 = i \leq 1,50$$

$$6 \leq x_4 = z \leq 12$$

$$0,25 \cdot \frac{2\pi}{z} \leq x_5 = \xi \leq \frac{2\pi}{z}$$

$$0,5 \leq x_6 = k_\beta \leq 1$$

$$1,0 \leq x_7 = k_\omega \leq 1,2$$

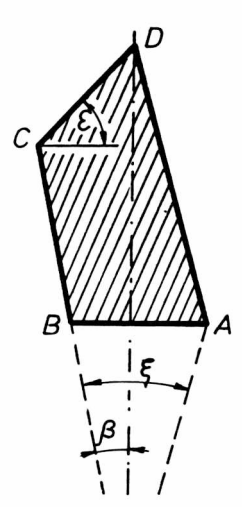
$$0,1 \leq x_8 = k_t \leq 0,25$$

otrzymuje się:

$$X_{\text{opt}} = \left\{ \begin{matrix} k_b=1,10; & \lambda=0,505; & i=1,206; & z=9 \\ \xi=0,466; & k_\beta=0,539; & k_\omega=1,125; & k_t=0,211 \end{matrix} \right\}.$$

Powyższy optymalizujący zbiór argumentów decyzyjnych prowadzi do koła wieloczerpakowego o następujących parametrach geometrycznych, kinematycznych i technologicznych (tab.VIII).

Tab.IX. Parametry koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysypem optymalnego w aspekcie wydajnościowym

$D_O = 3000$ [mm]	$\xi = 0,466$ [rad]	
$D_A = 1536$ [mm]	$\beta = 0,260$ [rad]	
$D_C = 2538$ [mm]	$\varepsilon = 0,809$ [rad]	
$H = 732$ [mm]	$z = 9$ [szt.]	
$b = 805$ [mm]	$q = 0,620$ [-]	
$AB = 352$ [mm]	$I = 0,193$ [m ³]	
$BC = 478$ [mm]	$k_n = 0,841$ [-]	
$CD = 362$ [mm]	$Q_e = 1682$ [m ³ /h]	
$\omega = 3,040$ [rad/s]	$k_E = 70,0$ [kJ/m ³]	
$n = 29,0$ [1/min]	$t_{max} = 693$ [mm]	

- W przypadku zadania optymalizacji sformułowanego w aspekcie energetycznym (wg algorytmu o schemacie blokowym przedstawionym na rys.25) dla zbioru parametrów N :

$$N = \left\{ \rho=800; \mu_{xs}=0,40; \mu_{xk}=0,34; \alpha_p=0,628; k_s=1,1; \right.$$

$$\delta=0; L=31,5; r=1; \gamma_0=0; k_h=0,5;$$

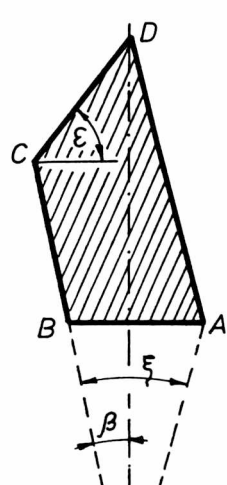
$$\left. k_{z(x)}=1; k_{z(y)}=0; \Delta=0,1; k_{En}=20 \right\} = \text{const.}$$

oraz dla ograniczeń prostych, dotyczących zbioru argumentów decyzyjnych takich samych jak w przypadku zadania optymalizacji rozpatrywanego w aspekcie konstrukcyjnym otrzymuje się:

$$x_{opt} = \left\{ \begin{array}{l} k_b=1,10; \quad \lambda=0,509; \quad i=1,141; \quad z=9 \\ \xi=0,466; \quad k_\beta=0,546; \quad k_\omega=1,032; \quad k_t=0,198 \end{array} \right\}.$$

Powyższy optymalizujący zbiór argumentów decyzyjnych prowadzi do koła wieloczerpakowego o następujących parametrach geometrycznych, kinematycznych i technologicznych (tab.X):

Tab. X. Parametry koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysypem optymalnego w aspekcie energetycznym

$D_O = 3076$ [mm]	$\xi = 0,466$ [rad]	
$D_A = 1566$ [mm]	$\beta = 0,254$ [rad]	
$D_C = 2440$ [mm]	$\varepsilon = 0,909$ [rad]	
$H = 755$ [mm]	$z = 9$ [szt.]	
$b = 830$ [mm]	$q = 0,439$ [-]	
$AB = 356$ [mm]	$I = 0,149$ [m ³]	
$BC = 442$ [mm]	$k_n = 0,825$ [-]	
$CD = 423$ [mm]	$Q_e = 1651$ [m ³ /h]	
$\omega = 3,029$ [rad/s]	$k_E = 62,0$ [kJ/m ³]	
$n = 28,9$ [1/min]	$t_{max} = 599$ [mm]	

Przeprowadzone obliczenia optymalizacyjne wykazują, że:

- niezależnie od tego czy funkcja celu zakłada minimalizację średnicy zewnętrznej koła czepakowego z odśrodkowym wysypem, czy maksymalizację jego wydajności, czy też minimalizację jednostkowej energochłonności przeładunku to optymalne wartości argumentów k_p , z oraz ξ są takie same dla wszystkich trzech typów rozpatrywanych funkcji celu;
- zakres zmian współczynnika prędkości k_ω we wszystkich trzech zadaniach optymalizacyjnych jest dość mocno ograniczony, przy czym przyjmuje największe wartości w przypadku maksymalizacji wydajności, natomiast w przypadku minimalizacji energochłonności procesu przeładunku tylko nieznacznie przekracza wartości lewostronnego ograniczenia $k_\omega \geq 1$.

8. PRZYKŁAD APLIKACJI UZYSKANYCH REZULTATÓW POZNAWCZYCH

Wyniki analiz przedstawionych w niniejszej pracy umożliwiają analizę roboczego procesu koła czepakowego z odśrodkowym wysypem, w warunkach przeładunku określonego typu materiału ziarnistego zadaną wydajnością teoretyczną. Przykład liczbowy tego typu analizy odniesiono do roboczego procesu koła czepakowego z

odśrodkowym wysypem w następujących warunkach:

- zadana wydajność teoretyczna przeładunku

$$Q_t = 2000 \text{ [m}^3/\text{h]};$$

- ładowany materiał

miął węgla kamiennego energetycznego z kilkuprocentową domieszką frakcji pyłowej i proszkowej o wilgotności 10 ÷ 15 [%], z zawartością popiołu do 15 [%];

- blokowy system ładowania ze zwał;
 - regulacja prędkości bocznej w zakresie

$$\gamma_{01} = -30^\circ, \quad \gamma_{02} = 60^\circ;$$

- długość wysięgnika $L = 31,5 \text{ [m]}$, kąt nachylenia $\delta = -14^\circ$;
 - praca wiórem pionowym w zakresie kąta urabiania

$$\phi_u = 110^\circ \pm 5^\circ$$

Przy przyjęciu założenia, że synteza konstrukcyjna koła czerpakowego będzie prowadzona z uwzględnieniem kryterium energetycznego optymalizacji, tzn. w oparciu o algorytm optymalizacji wg rys.25, wówczas otrzymuje się:

$$k_E(X_{opt}) = \left\{ k_{En} + \rho * g * \frac{D_0}{2} * k_\omega^2 + k_p * D_0 * \rho * g \right\} = \min$$

dla:

$$X_{opt} = \left\{ \begin{array}{l} k_b=1,10; \quad \lambda=0,509; \quad i=1,141; \quad z=9 \\ \xi=0,466; \quad k_\beta=0,546; \quad k_\omega=1,032; \quad k_t=0,198 \end{array} \right\}.$$

Otrzymane koło czerpakowe z odśrodkowym wysypem charakteryzuje się następującymi parametrami geometrii, kinematyki i technologii pracy:

Średnica zewnętrzna wg (150) :

$$D_0 = \sqrt[5]{\left[\frac{Q_t}{\frac{\sqrt{2} \cdot g}{32 \cdot \pi} \cdot q \cdot k_\omega \cdot k_b \cdot z \cdot \left[\frac{2 \cdot \pi}{z} - \xi_C \right] \cdot (1 - \lambda) \cdot (1 - \lambda^2)} \right]^2} = 3,076 \text{ [m]},$$

gdzie:

$$Q_t = 2000 \text{ [m}^3/\text{h]} = 0,556 \text{ [m}^3/\text{s]};$$

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]};$$

$$k_\omega = 1,032;$$

$$k_b = 1,100;$$

$$z = 9;$$

$$\lambda = 0,509;$$

$$q = \frac{2 \cdot \lambda \cdot [(1 - \lambda) \cdot \sin(k_\beta \cdot \xi) + (1 - \lambda) \cdot \sin \frac{\xi}{2}]}{\xi \cdot (1 - \lambda^2)} = 0,439;$$

gdzie:

$$\xi = 0,466 \text{ [rad]} \cong 26,7 \text{ [}^\circ\text{]};$$

$$\xi_C = \frac{2 \cdot \pi - z \cdot \xi}{z} = 0,232 \text{ [rad]} \cong 13,3 \text{ [}^\circ\text{]};$$

$$\beta = k_\beta \cdot \xi = 0,254 \text{ [rad]} \cong 14,6 \text{ [}^\circ\text{]}.$$

Wysokość czepaka wg 9113) :

$$H = 0,5 \cdot D_0 \cdot (1 - \lambda) = 0,755 \text{ [m]}.$$

Szerokość czepaka wg (114) :

$$b = k_b \cdot H = 0,830 \text{ [m]}.$$

Średnica wewnętrzna wg (111) :

$$D_A = \lambda \cdot D_0 = 1,566 \text{ [m]}.$$

Pojemność obliczeniowa pojedynczego czepaka wg (110) :

$$I = q \cdot k_b \cdot \frac{\xi \cdot D_0^3 \cdot (1 - \lambda) \cdot (1 - \lambda^2)}{16} = 0,149 \text{ [m}^3\text{]}$$

Współczynnik napełnienia czerpaków (wg 47) :

$$k_n = 0,90 + 1,195 * k_t' * \varepsilon - 1,013 * \varepsilon * k_\omega = 0,825;$$

gdzie:

$$k_t' = \frac{k_t}{0,5 * (1 - \lambda)} = 0,807;$$

gdzie:

$$k_t = 0,198;$$

$$\varepsilon = \arcsin \frac{(1 - i * \lambda) * \sin \delta_D}{i * \lambda * \sin(k_\beta * \xi)} = 0,909 \text{ [rad]} \cong 52,1 \text{ [}^\circ\text{]};$$

gdzie:

$$\delta_D = \arcsin \frac{i * \lambda * \sin \beta}{\sqrt{1 + i * \lambda * (i * \lambda - 2 * \cos \beta)}} = 0,323 \text{ [rad]};$$

$$\beta = k_\beta * \xi = 0,254 \text{ [rad]}.$$

Prędkość kątowna wysięgnika wg (127) :

$$\omega_{b(\max)} = \frac{v_0}{L_h} = \frac{v_{b(\max)}}{L * \cos \delta + 0,5 * D_0} = 0,0097 \text{ [rad/s]}$$

$$\omega_{b(\min)} = \frac{v_0}{L_h} = \frac{v_{b(\min)}}{L * \cos \delta + 0,5 * D_0} = 0,0048 \text{ [rad/s]}$$

gdzie:

$$\delta = -14^\circ;$$

$$L = 31,5 \text{ [m]};$$

$$v_{b(\max)} = v_{b0} * \frac{\cos \gamma_r}{\cos \gamma_0} = 0,445 \text{ [m/s]}; \gamma_r = 90^\circ;$$

$$v_{b(\min)} = v_{b0} * \frac{\cos \gamma_r}{\cos \gamma_0} = 0,222 \text{ [m/s]}; \gamma_r = 60^\circ;$$

$$v_{b0} = \frac{k_n * \frac{\sqrt{2 * g}}{32 * \pi} * q * k_\omega * k_b * \xi * z * (1 - \lambda) * (1 - \lambda^2) * \sqrt{D_0}}{k_s * k_w} = 0,445 \text{ [m/s]};$$

gdzie:

$$k_w = k_t * k_h = 0,099, \quad - \text{wg (134)};$$

$$k_t = 0,198; \quad k_h = 0,5.$$

Wydajność efektywna koła czerpakowego wg (128) :

$$Q_e = D_0^2 * k_t * k_h * k_s * \cos \gamma_0 * v_{b0} = 0,459 \text{ [m}^3/\text{s]} = 1651 \text{ [m}^3/\text{s]}.$$

Jednostkowa praca przyspieszania wg (140) :

$$k_{Ea} = \rho * g * \frac{D_0^2}{2} * k_w^2 = 14,5 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Jednostkowa praca podnoszenia wg (141) :

$$k_{Ep} = k_p * D_0 * \rho * g = 19,0 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

gdzie:

$$k_p = H_p / D_0 = 0,699;$$

$$H_p = H_{p1} + H_{p2} = 2,15 \text{ [m]} \quad - \text{wg (48)},$$

gdzie:

$$H_{p1} \cong 0,5 * (D_0 - H) = 1,16 \text{ [m]} \quad - \text{wg (49)},$$

$$H_{p2} = \frac{1}{3} * h_w + 0,5 * D_0 * \cos \phi_u = 0,99 \text{ [m]},$$

gdzie:

$$h_w = 0,5 * D_0 * \phi_u = 2,95 \text{ [m]}$$

$$\phi_u = 90^\circ.$$

Jednostkowa praca napełniania wg tab.VII :

$$k_{En} = 23,3 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Całkowita jednostkowa praca koła czerpakowego wg (139) :

$$k_E = k_{En} + k_{Ea} + k_{Ep} = 56,8 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Pobór mocy koła czerpakowego :

$$P = k_E * Q_e = 93777 \text{ [kW]}.$$

Przedstawiony przykład obliczeń optymalizacyjnych dotyczących syntezy podstawowych parametrów geometrii, kinematyki i technologii pracy koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem w warunkach przeładunku mialu węglowego z założoną wydajnością teoretyczną $Q_t = 2000 \text{ [m}^3/\text{h]}$ umożliwia porównanie otrzymanych wyników z danymi, którymi charakteryzuje się istniejąca ładowarko-zwałowarka ŁZKS-500.31,5 z kołem czerpakowym realizującym grawitacyjny wysyp urobku również z wydajnością teoretyczną $Q_t = 2000 \text{ [m}^3/\text{h]}$ (tab. VII).

Z przeprowadzonej analizy porównawczej wynika, że w warunkach przeładunku mialu węgla energetycznego koło czerpakowe z odśrodkowym wysypem o parametrach:

$$D_0 = 3,0 \text{ [m]}; I = 0,015 \text{ [m}^3\text{]}; z = 9; v = 3,97 \text{ [m/s]}$$

oraz koło czerpakowe z wysypem grawitacyjnym o parametrach:

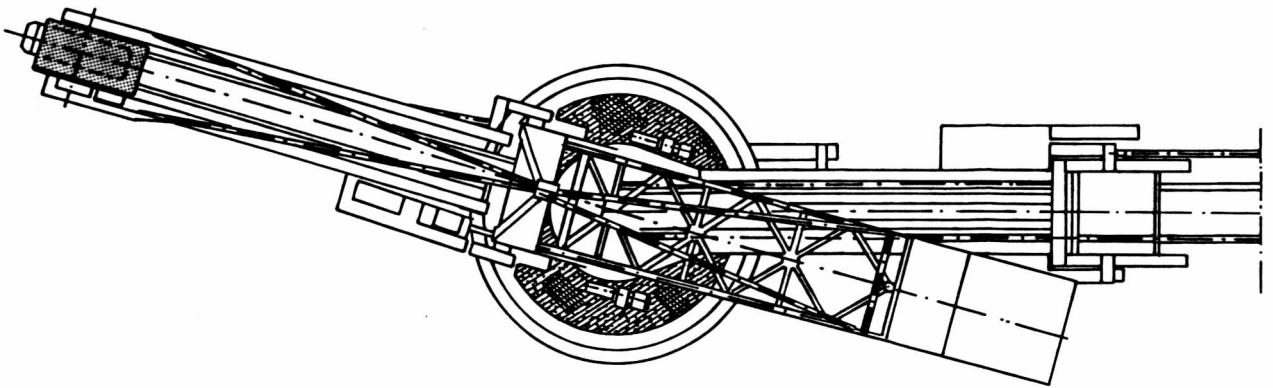
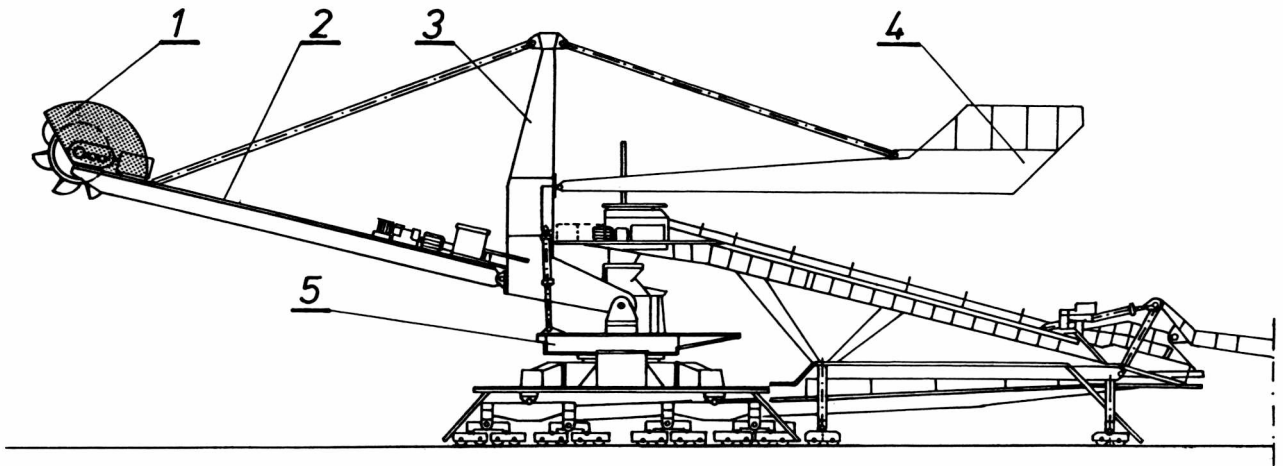
$$D_0 = 6,3 \text{ [m]}; I = 0,500 \text{ [m}^3\text{]}; z = 8; v = 2,75 \text{ [m/s]}$$

charakteryzują się prawie identyczną wydajnością efektywną $Q_e = 1600 \text{ [m}^3/\text{h]}$ przy prawie identycznej jednostkowej energochłonności przeładunku $k_E = 60 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$. Ponieważ ciężar koła czerpakowego w sposób dominujący wpływa na dobór głównych parametrów konstrukcyjnych wysięgnika, jego przeciwwagi oraz podwozia maszyny przeładowniczej z tego względu ponad dwukrotne zmniejszenie średnicy koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem w stosunku do średnicy koła z wysypem grawitacyjnym - przy zachowaniu tej samej wydajności i energochłonności przeładunku - wskazuje, że koncepcja maszyny przeładowniczej z odśrodkowym wysypem urobku jest racjonalna i w pełni uzasadniona głównie z punktu widzenia oszczędności materiałów konstrukcyjnych zużywanych w budowie tej klasy maszyn roboczych.

Koncepcję maszyny przeładowniczej z odśrodkowym wysypem pokazano na rys. 26.

9. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Analiza światowych trendów rozwojowych w zakresie budowy i eksploatacji mechanicznych systemów realizujących procesy ciągłego przeładunku materiałów ziarnistych wskazuje, że trendy te



Rys.26. Koncepcja kołowo-czerpakowej maszyny przeładowniczej z odśrodkowym wysypem. 1 - koło czerpakowe z zsuwnią kierującą, 2 - wysięgnik, 3 - iglica, 4 - przeciwwaga, 5 - podwozie.

zmierzają głównie w kierunku poszukiwania nowych, zautomatyzowanych, energo- i materiałooszczędnych systemów roboczych.

Zaprezentowane w pracy wyniki studiów analitycznych, badań eksperymentalnych oraz analiz optymalizacyjnych dowiodły, że koncepcja budowy kołowo-czerpakowych maszyn składowiskowych pracujących wg zasady odśrodkowego opróżniania czerpaków jest racjonalna i w pełni uzasadniona głównie z punktu widzenia oszczędności materiałów konstrukcyjnych niezbędnych do ich budowy.

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące główne wnioski:

- (i) Proces roboczy szybkoobrotowego koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem urobku można scharakteryzować w wystarczająco pełny sposób zbiorem wskaźników, które wyrażają:

- wydajność teoretyczną procesu przeładunku;
- wydajność efektywną procesu przeładunku;
- stopień napełnienia czerpaków w procesie przeładunku;
- jednostkową energochłonność przeładunku.

Decydujący wpływ na zmienność tych wskaźników ma średnica zewnętrzna koła czerpakowego, geometria i rozstaw (liczba) czerpaków, ich prędkość obwodowa i boczna jak również fizyko-mechaniczne własności ładowanych materiałów ziarnistych, a głównie ich granulacja, ciężar usypowy, spójność (kohezja), tarcie wewnętrzne i zewnętrzne.

- (ii) Modelowanie matematyczne roboczego procesu koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem jest w pełni możliwe poprzez wydzielenie czterech powtarzalnych sekwencji jego ruchu, z którymi wiążą się następujące procesy składowe:

- 1) proces napełniania czerpaków;
- 2) proces podnoszenia zaczerpniętych porcji urobku przez układ konstrukcyjny koła;
- 3) proces odśrodkowego wysypu urobku w ruchu kołowym czerpaków;
- 4) proces ukośnego rzutu pojedynczych cząstek i grup cząstek do układu odbierającego strumień urobku (do kosza zsypowego).

Formuły obliczeniowe uzyskane na drodze rozważań

analitycznych dotyczących czterech wyróżnionych sekwencji ruchu szybkoobrotowego koła czerpakowego, odniesione do procesu przeładunku:

- granulatu polistyrenu (materiał idealnie sypki);
- żwiru bezkohezyjnego (materiał abrazywny);
- miazgi węglowej (materiał kohezyjny);

znajdują eksperymentalne potwierdzenie z dokładnością wystarczającą w zastosowaniach praktycznych.

(iii) Zagadnienie optymalnej syntezy konstrukcyjnej kół wieloczerpakowych z odśrodkowym wysypem daje się formułować w postaci zadań ekstremalnych, które w ogólnej teorii optymalizacji są określane mianem zadań programowania nieliniowego z ograniczeniami (funkcyjnymi i prostymi). Synteza ta może być rozpatrywana w aspekcie:

- konstrukcyjnym, polegającym na poszukiwaniu koła czerpakowego, które przy wymaganej wydajności teoretycznej przeładunku posiada minimalną średnicę zewnętrzną;
- wydajnościowym, polegającym na poszukiwaniu koła czerpakowego, które przy zadanej średnicy zewnętrznej tego koła będzie realizować proces przeładunku z maksymalną wydajnością efektywną;
- energetycznym, polegającym na poszukiwaniu koła czerpakowego, które przy zadanej wydajności teoretycznej przeładunku będzie realizować ten proces z minimalną jednostkową energochłonnością.

Wyniki przeprowadzonej w pracy optymalizacyjnej analizy roboczego procesu koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem potwierdzają skuteczność i pewność opracowanego numerycznego algorytmu obliczeń optymalizacyjnych, bazującego na statystycznej metodzie Monte-Carlo.

(iv) Z przeprowadzonej analizy porównawczej prototypowego koła czerpakowego z wysypem odśrodkowym przystosowanego do przeładunku kohezyjnego miazgi węglowej z wydajnością teoretyczną $Q_t = 2000 \text{ [m}^3/\text{h]}$ oraz konwencjonalnego koła czerpakowego, realizującego proces przeładunku tego samego materiału również z wydajnością teoretyczną $Q_t = 2000 \text{ [m}^3/\text{h]}$ wynika, że oba typy kół czerpakowych charakteryzują

się prawie identyczną wydajnością efektywną przeładunku $Q_e = 1600 \text{ [m}^3/\text{h]}$ i prawie identyczną jednostkową energochłonnością przeładunku $k_E \cong 60 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$, lecz koło czerpakowe realizujące wysyp odśrodkowy w stosunku do koła czerpakowego realizującego wysyp grawitacyjny posiada ponad dwukrotnie mniejszą średnicę, a tym samym znacząco mniejszą masą.

- (v) Przedstawiona metoda matematycznego modelowania i analizy optymalizacyjnej kół wieloczerpakowych z odśrodkowym wysypem, po uwzględnieniu odpowiednich działań adaptacyjnych, może być również wykorzystywana w teorii projektowania szybkobieżnych przenośników kubełkowych oraz przenośników z taśmą skrzynkową, pracujących wg zasady odśrodkowego wysypu nosiwa.

OPIS OZNACZEŃ

a	- podziałka rozstawu czerpaków odniesiona do ich czołowych, zewnętrznych krawędzi, [m]
a_1, a_2, a_3	- współczynniki równania regresji
b	- szerokość czerpaka, [m]
$b_{0(max)}$	- maksymalna szerokość zaczerpywanego wióra, [m]
c	- kohezja materiału ziarnistego, [kN/m ²]
d	- średnica pojedynczego ziarna, [m]
D_0	- średnica zewnętrzna koła czerpakowego, [m]
d_m	- średnia średnica ziarna, [m]
e	- wskaźnik porowatości, [%]
f_c	- wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie materiału ziarnistego, [kN/m ²]
F_0	- siła odśrodkowa, [kN]
g	- przyspieszenie ziemskie, [m/s ²]
G	- ciężar masy elementarnej materiału ziarnistego, [kN]
h	- wysokość zaczerpywanego wióra, [m]
H	- wysokość czerpaka, [m]
H_p	- wysokość podnoszenia urobku w kole czerpakowym, [m]
H_{p1}, H_{p2}	- składowe wysokości podnoszenia urobku w kole czerpakowym, [m]
i	- współczynnik formy czerpaka, [-]
I	- pojemność czerpaka, [m ³]
k_b	- współczynnik szerokości czerpaka, [-]
k_e	- współczynnik zagęszczenia, [-]
k_E	- całkowita jednostkowa praca przeładunku materiału ziarnistego kołem czerpakowym z odśrodkowym wysypem, [kJ/m ³]
k_{Ea}	- jednostkowa praca przyspieszania materiału ziarnistego zaczerpywanego kołem czerpakowym, [kJ/m ³]
k_{En}	- jednostkowa praca napełniania czerpaków, [kJ/m ³]
k_{Ep}	- jednostkowa praca podnoszenia materiału ziarnistego w kole czerpakowym, [kJ/m ³]

k_h	- współczynnik wysokości zaczerpywanego wióra, [-]
k_n	- współczynnik napełnienia czerpaka, [-]
k_p	- współczynnik podnoszenia urobku w kole czerpakowym, [-]
k_s	- współczynnik spulchnienia, [-]
k_t	- współczynnik grubości zaczerpywanego wióra odniesiony do zewnętrznej średnicy D_0 koła, [-]
k_t'	- współczynnik grubości zaczerpywanego wióra odniesiony do wysokości H czerpaka, [-]
$k_{z(x)}, k_{z(y)}$	- współczynniki położenia skrajnej krawędzi kosza zsykowego, [-]
k_β	- współczynnik formy czerpaka, [-]
k_ω	- współczynnik prędkości obrotowej koła czerpakowego, [-]
L	- długość wysięgnika koła czerpakowego, [m]
n	- liczba obrotów koła czerpakowego, [1/s]
N	- reakcja normalna na górnej ścianie czerpaka, [kN]
n_p	- porowatość, [%]
n_w	- liczba wysypów w kole czerpakowym, [1/s]
O	- powierzchnia właściwa materiału ziarnistego, [1/m]
q	- współczynnik geometrycznej formy czerpaka, [-]
Q_e	- wydajność efektywna koła czerpakowego, [m ³ /h]
Q_t	- wydajność teoretyczna koła czerpakowego, [m ³ /h]
r	- średni promień hydrauliczny luk i pustek międzyziarnowych, [m]
r	- współczynnik regulacji prędkości bocznej koła czerpakowego, [-]
s	- przemieszczenie cząstki w ruchu względnym, [m]
$\dot{s}$	- prędkość przemieszczenia w ruchu względnym, [m/s]
$\ddot{s}$	- przyspieszenie cząstki w ruchu względnym, [m/s ²]
S_w	- stopień wilgotności materiału ziarnistego, [%]
t	- czas, [s]
T	- opór tarcia, [kN]
t_e	- czas ruchu względnego cząstki na górnej ścianie czerpaka, [s]

$t_{\max}$	- maksymalna grubość zaczerpywanego wióra, [m]
v	- prędkość obwodowa koła czerpakowego, [m/s]
v_b	- prędkość boczna koła czerpakowego, [m/s]
v_{b0}	- prędkość boczna koła czerpakowego w poziomym położeniu wysięgnika ($\delta=0$), [m/s]
v_{x0}, v_{y0}	- składowe prędkości początkowej pierwszej cząstki w jej rzucie ukośnym, [m/s]
v_{xk}, v_{yk}	- składowe prędkości początkowej ostatniej cząstki w jej rzucie ukośnym, [m/s]
x_0, y_0	- współrzędne punktu, w którym rozpoczyna się rzut ukośny pierwszej cząstki wyrzuconej z czerpaka, [m]
x_k, y_k	- współrzędne punktu, w którym rozpoczyna się rzut ukośny ostatniej cząstki wyrzuconej z czerpaka, [m]
X_w	- wilgotność materiału ziarnistego, [%]
x_z, y_z	- współrzędne skrajnej krawędzi kosza zsypowego, [m]
z	- liczba czerpaków, [-]
α_0	- kąt obrotu czerpaka określający początek odśrodkowego wysypu, [rad]
α_k	- kąt obrotu czerpaka, w którym następuje zakończenie odśrodkowego wysypu, [rad]
α_p	- kąt pobocznicy zwału materiału ziarnistego, [rad]
α_r	- kąt obrotu czerpaka, który rozgranicza okres rozwiniętego wysypu od okresu wysypu końcowego, [rad]
β	- kąt środkowy górnej ścianki czerpaka, [rad]
δ	- kąt nachylenia wysięgnika koła czerpakowego, [rad]
Δ	- parametr konstrukcyjny koła czerpakowego wg rys.18, [m]
$\delta_C, \delta_D, \delta_t$	- kąty pomocnicze, [rad]
ε	- kąt nachylenia górnej ścianki czerpaka, [rad]
ϕ	- chwilowy kąt tarcia wewnętrznego, [rad]
ϕ	- kąt obrotu koła czerpakowego, [rad]
ϕ_e	- efektywny kąt tarcia wewnętrznego w materiale ziarnistym, [rad]
ϕ_u	- kąt urabiania kołem czerpakowym, [rad]
ϕ_{xk}	- kinematyczny kąt tarcia zewnętrznego, [rad]
ϕ_{xs}	- statyczny kąt tarcia zewnętrznego, [rad]

γ	- ciężar usypowy materiału ziarnistego, $[\text{kN}/\text{m}^3]$
γ_0	- kąt obrotu wysięgnika koła czerpakowego, $[\text{rad}]$
γ_r	- kąt regulacji prędkości bocznej koła czerpakowego, $[\text{rad}]$
κ	- wskaźnik formy czerpaka, $[\text{m}^{-\frac{2}{3}}]$
λ	- współczynnik wysokości czerpaka, $[-]$
ν, ν_t	- kąty pomocnicze, $[\text{rad}]$
ρ	- gęstość usypowa materiału ziarnistego, $[\text{kg}/\text{m}^3]$
σ	- naprężenie normalne, $[\text{kN}/\text{m}^2]$
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	- naprężenia główne, $[\text{kN}/\text{m}^2]$
σ_{ij}	- tensor naprężeń
σ_z	- wytrzymałość na rozciąganie materiału ziarnistego, $[\text{kN}/\text{m}^2]$
τ	- naprężenie styczne, $[\text{kN}/\text{m}^2]$
ψ_A	- współczynnik kształtu ziarna, $[-]$
ξ	- kąt środkowy czerpaka, $[\text{rad}]$
ω	- prędkość kątowna koła czerpakowego, $[\text{rad}/\text{s}]$
ω_k	- krytyczna prędkość kątowna koła czerpakowego, $[\text{rad}/\text{s}]$

LITERATURA

- [1] Batel W.: Einführung in die Körngrößenmeßtechnik. Springer Verlag. Berlin. 1971.
- [2] Beckert R., Föll R.: Untersuchung der Abwurfverhältnisse an Kettenbecherwerken. Förd. u. Heb. Nr 10/1966.
- [3] Beljakow J.I., Wladimirow W.M.: Rabočie organy rotornych ekskavatorov. Mašinostroenie, Moskwa 1967.
- [4] Beumer B., Wehmeier K.H.: Zur Frage des Schöpfwiderstandes und der Abwurfverhältnisse bei Becherwerken. Förd. u. Heb. Teil I. Nr 11/1960; Teil II. Nr 1/1961.
- [5] Bewerly G.I., Roberts A.A., Hayes I.W.: Mechanics of high speed elevator discharge. Bulk Solids Handl. Nr 3/1984.
- [6] Dombrowski N.G.: Mnogokovševye ekskavatory. Mašinostroenie, Moskva 1972.
- [7] Drescher A.: Metody obliczeń parć i przepływu materiałów ziarnistych w zbiornikach. PWN, Warszawa, 1983.
- [8] Dudek D., Mateja I., Welik S., Witkowski Z.: Badania eksploatacyjne ładowarko-zwałowarki typu ŁZKS-1600.33,5. Raport Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. Nr 828/82.
- [9] Durst W., Vogt W.: Schaufelradbagger. Trans. Tech. Public. Clausthal-Zellerfeld 1986.
- [10] Ellwanger K.D.: Einflussgrößen auf den Schöpfvorgang bei schnellaufenden Becherwerken. Dissertation, Tech. Universität Hannover, 1978.
- [11] Fluks I.M.: Effektiver Förderstrom und optimale Abmessungen von Schaufelrädern. Förd. u. Heb. Nr 8/1972.
- [12] Fört I.C.: Berechnung und Auslegung von Becherwerken. Förd. u. Heb. 8/1973.
- [13] Gliński J.: Energetyczne wskaźniki właściwości skał i procesów wydobywczych. Studia monograficzne Z.26. Wyższa Szkoła Inżynierska, Opole 1988.

- [14] Goździcki M i inni: Doskonalenie konstrukcji i metod obliczeniowych przenośników do pionowego transportu materiałów sypkich. Temat nr 02.13.01. CPBP-02.05. Inst. Masz. Rob. Ciężk. Polit. Warsz., Etap I/86; II/87; III/88; IV/89.
- [15] Greń J.: Statystyka matematyczna. PWN, Warszawa 1987.
- [16] Hawrylak H., Dudek D., Welik S.: Metodyka wyznaczania obciążeń zewnętrznych wysięgników urabiających wielonaczyniowych koparek i ładowarek kołowych. Prace Naukowe Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. 19/1973.
- [17] Hawrylak H., Herman R.: Obciążenia zewnętrzne mechanizmów roboczych wielonaczyniowych ładowarek kołowych. Maszyny urabiające i ładujące. Prace naukowe Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. 22/1973.
- [18] Hawrylak H., Sobolski M.: Maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego. Wyd. "Śląsk", Katowice 1967.
- [19] Hawrylak H. i inni: Badania ładowarko-zwałowarki ŁZKS-1000.31. Raport Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. Nr 178/1971.
- [20] Hawrylak H. i inni: Badania ładowarko-zwałowarki ŁZKS-500.28. Raport Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. Nr 33/1973.
- [21] Hawrylak H. i in.: Badania ładowarko-zwałowarki firmy Delattre-Leviver. Raport Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. Nr 524/78.
- [22] Hawrylak H. i inni: Badania procesu przeładunku ciągłego mułów i mieszanek węglowych. Raport Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. Nr 716/81.
- [23] Herms H.: Entleeren der Eimer von Elevatoren. Förd. u. Heb. Nr 3/4/1975.
- [24] Hoffman D.: Beitrag zur Auslegung des Graborganes und des Förderweges eines Schaufelradbaggers. Braunkohle Nr 1/2/1982.
- [25] Jendo S., Marks W.: Zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej konstrukcji inżynierskich. Rozpr. Inż. Nr 4/1986.

- [26] Jenike A.W.: Storage and flow of solids. Bull. of the University of Utah, No.123, 1964.
- [27] Kacprzyński B.: Planowanie eksperymentów. Podstawy matematyczne. PWN, Warszawa 1974.
- [28] Khosravi M.A.: Bestimmung des Eimerabstands. Zur Theorie des Schaufelredes. Förd. u. Heb. 14/1973.
- [29] Kołkiewicz W.: Zastosowanie maszyn podstawowych w górnictwie odkrywkowym: Wyd. "Śląsk". 1974.
- [30] Korzeń Z.: Mechanika procesu przecinania ośrodka rozdrobnionego elementarnymi profilami liniowymi. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Seria Monografie Nr 38/1981.
- [31] Korzeń Z.: Optymalizacja geometrii i kinematyki bezkomorowych kół wieloczerpakowych w ładowarkach o ruchu ciągłym. Arch. Górn. Nr 3/1984.
- [32] Korzeń Z.: Mathematical modelling of the cutting process of strongly heterogenous bulk materials with curvilinear edge tools. Stud. Geotech. et Mechan., vol.7, No.1. 1985.
- [33] Korzeń Z.: Modelowanie dynamiczne odśrodkowego wysypu urobku skalnego w ciągnowo-czerpakowych maszynach przeładowniczych. Arch. Górn. Nr 4/1987.
- [34] Korzeń Z.: Mechanics of gravitational discharge of cellless bucket wheels in reclaiming machines. Bulk Solids Handl. Nr 6/1987.
- [35] Korzeń Z.: Modelowanie dynamiczne przepływu strumienia urobku w wielonaczyniowej maszynie przeładowniczej z odśrodkowym wysypem. Etap I/1987. Analityczne studium rozpoznawcze procesu roboczego szybkoobrotowych, wielonaczyniowych układów przeładowniczych oraz opracowanie założeń do budowy stanowiska doświadczalnego. Raport Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocł. Nr 85/1987.
- [36] Korzeń Z.: Mechanics of belt conveyor discharge process as affected by air drag. Bulk Solids Handl. Nr 3/1989.

- [37] Korzeń Z., Dudek K.: Modelowanie dynamiczne przepływu strumienia urobku w wielonaczyniowej maszynie przeładowniczej z odśrodkowym wysypem. Etap II/1988. Modelowanie matematyczne i analiza optymalizacyjna procesu roboczego kołowo-czerpakowych układów przeładowniczych z odśrodkowym wysypem. Raport Inst. Konstr. i Ekspł. Masz. Polit. Wrocł. Nr 139/1988.
- [38] Korzeń Z., Dudek K.: Modelowanie dynamiczne przepływu strumienia urobku w wielonaczyniowej maszynie przeładowniczej z odśrodkowym wysypem. Etap III/1989. Weryfikacja eksperymentalna modeli analitycznych roboczego procesu koła czerpakowego z odśrodkowym wysypem. Raport Inst. Konstr. i Ekspł. Masz. Polit. Wrocł. Nr 89/1989.
- [39] Korzeń Z., Dudek K.: Model matematyczny wydajności roboczego procesu koła wieloczerpakowego z odśrodkowym wysypem. Prace nauk. Polit. Warsz., Z. 121/1989.
- [40] Koster K.H.: Centrifugal discharge of bucket elevators. Bulk Solids Handl. Nr 2/1985.
- [41] Koster K.H.: Zum Problem der Restentleerung schnellaufender Becherwerke. Aufbereitungs-Technik. Nr 9/1986.
- [42] Koster K., Huvers J.: Zur Theorie des Schüttgutabwurfs schnellaufender Becherwerke mit Fliehkraftentleerung. Aufbereitungs Technik. Nr 2/1990.
- [43] Krause F.: Entleerungsvorgang bei zellenloser Schaufelrädern, 5, d.h.f. (1972).
- [44] Krause F., Hentschel R.: Untersuchungen zur Steigerung des Volumendurchsatzes von Becherförderern. Wissenschaft. Zeitschr. der Technischen Hochschule Otto von Guericke. Magdeburg. H. 6/1982.
- [45] Krumrey A.: Optimization of design of excavator bucket wheel. W: International Conference on Mining and Machinery. Brisbane 1979.
- [46] Kühnast H., Milde G.: Untersuchungen des Entleerungsvorgang an zellenlosen Schaufelrädern. Freiburger Forschungshefte A-451, 28+49 (1968).

- [47] Łazowski A.: Badania eksploatacyjne ładowarki suwnicowej na składowisku mieszanki spiekalniczej w Hucie Katowice. Raport Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. Nr 74/1988.
- [48] Łazowski A.: Model cyfrowy procesu uśredniania własności ośrodków rozdrobnionych maszynami przeładunkowymi o ruchu ciągłym. Komunikat Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. Nr 441/78 (rozprawa doktorska).
- [49] Mateja I., Welik S., Witkowski Z.: Badania przeładunku żużli granulowanych ładowarkami kołowymi typu ŁWKS w Hucie Katowice. Raport Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. Nr 652/80.
- [50] Mateja I., Welik S., Witkowski Z.: Wyznaczanie obciążeń zewnętrznych i wydajności ładowarko-zwałowarek kołowych w warunkach zimowych na podstawie badań eksploatacyjnych. Opracowanie zbiorcze. Raport Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. Nr 627/80.
- [51] Michałek M.: Wpływ parametrów kinematycznych i konstrukcyjnych koła czerpakowego na wydajność ładowarek kołowych, wielonaczyniowych. Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. Wrocław 1973 (rozprawa doktorska).
- [52] Molerus O.: Schüttgutmechanik - Grundlagen und Anwendungen in der Verfahrenstechnik. Springer-Verlag. Berlin, 1985.
- [53] Mróz Z., Drescher A., Hüeckel T.: Doskonalenie metod badania parametrów płynięcia materiałów ziarnistych. Prace IPPT, 54/1973.
- [54] Mundt B.R.: Wirtschaftliche Auslegung von Schaufelrad - - Geräten. Förd. u. Heb. Nr 8/1971.
- [55] Musiał W.: Określenie oporów właściwych w procesie mechanicznego urabiania skał ilastych. Inst. Konstr. i Ekspl. Masz. Polit. Wrocław. Wrocław 1972. (rozprawa doktorska)
- [56] Osiński Z., Wróbel J.: Teoria konstrukcji maszyn. PWN. Warszawa 1982.
- [57] Pajer G., Pfeifer A., Kurth F.: Tagebaugrossgeräte und Universalbagger. VEB Verlag Technik. Berlin 1971.

- [58] Pieczonka K.: Maszyny urabiające. Podstawy urabiania i przemieszczania. Skrypt Polit. Wrocł., Wrocław 1988.
- [59] Polański Z.: Metody optymalizacji w technologii maszyn. PWN, Warszawa 1977.
- [60] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
- [61] Rademacher I.I.C.: Non-spill discharge characteristics of bucket elevators. Power Technol. Nr 22/1979.
- [62] Spivakovsky A., Dyachkov V.: Conveying Machines. vol.II. Mir Publishers, Moscow 1985.
- [63] Szczepiński W.: Stany graniczne i kinematyka ośrodków sypkich. PWN. Warszawa 1974.
- [64] Szepietowski W.: Określenie oporów właściwych w procesie mechanicznego urabiania węgla brunatnego. Inst. Konstr. i Ekspł. Masz. Polit. Wrocł. Wrocław 1972 (rozprawa doktorska).
- [65] Taranow D.J.: Metodika issledovaniya centrobežnoj rozgruzki. Gornotransportnoe oborudovanie karierov. Technika. 1969.
- [66] Taranow D.J. K voprosu o wynosnoj sposobnosti kovšej rotornogo rabočego organa kavernogo ekskavatora s centrobežnoj rozgruzkoj. Fizikotekničeskie problemy razrabotki poleznych iskopaemych. No 10/1968.
- [67] Wehking K.H., Hüning R.: Untersuchungen zur Verbesserung des Befüllungsvorganges von Gurtbecherwerken. Förd. u. Heb. Nr 8/1988.
- [68] Wöhlbier R.H.: Stacking, Blending, Reckleiming of Bulk Materials, Trans Technik Publications, Clausthal-Zellerfeld 1977.
- [69] Xie Xichun: Optimization of the main parameters of the digging mechanism in the bucket wheel excavator. Mining Science and Technology. Trans. Tech. Publications. Clausthal-Zellerfeld 1987.

ZAŁĄCZNIK 1.

Bazując na układzie równań:

$$-\mu_{xk} * N + m * \omega^2 * r_t * \cos \delta_t + m * g * \cos(180 - \nu_t) - m * \ddot{s}(t) = 0$$

$$-N + 2 * m * \omega * \dot{s}(t) - m * g * \sin(180 - \nu_t) + m * \omega^2 * r_t * \sin \delta_t = 0$$

$$\nu_t = \alpha_r + \delta_C + \omega * t + \xi - \frac{\pi}{2}$$

$$\cos \delta_t = \frac{1}{r_t} * \left[i * \lambda * \frac{D_0}{2} * \cos \delta_C + s(t) \right]$$

$$\sin \delta_t = \frac{1}{r_t} * i * \lambda * \frac{D_0}{2} * \sin \delta_C$$

otrzymuje się wyjściowe równanie różniczkowe:

$$\frac{d^2 s}{d(\omega * t)^2} + 2 * \mu_{xk} * \frac{ds}{d(\omega * t)} - s = \frac{i * \lambda * D_0 * \cos(\delta_C + \phi_{xk})}{2 * \cos \phi_{xk}} - \frac{g * \sin(\alpha_r + \delta_C + \omega * t + \phi_{xk} - \xi - \frac{\pi}{2})}{\omega^2 * \cos \phi_{xk}}$$

Równanie to można również wyrazić w następującej postaci:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 s}{d(\omega * t)^2} + 2 * \mu_{xk} * \frac{ds}{d(\omega * t)} - s = \\ & = \frac{i * \lambda * D_0 * \cos(\delta_C + \phi_{xk})}{2 * \cos \phi_{xk}} + \frac{g}{\omega^2 * \cos \phi_{xk}} * \cos(\alpha_C + \delta_C + \phi_{xk} - \xi - \frac{\pi}{2}) + \\ & + \frac{g}{\omega^2 * \cos \phi_{xk}} * \sin(\alpha_C + \delta_C + \phi_{xk} - \xi - \frac{\pi}{2}) * \sin(\omega * t) \end{aligned}$$

lub prościej:

$$\frac{d^2 s}{d(\omega * t)^2} + 2 * \mu_{xk} * \frac{ds}{d(\omega * t)} - s = C - A * \cos(\omega * t) + B * \sin(\omega * t)$$

gdzie:

$$C = \frac{i * \lambda * D_0 * (\delta_C + \phi_{xk})}{2 * \cos \phi_{xk}},$$

$$A = - \frac{g}{\omega^2 * \cos \phi_{xk}} * \cos(\alpha_C + \delta_C + \phi_{xk} - \xi - \frac{\pi}{2}),$$

$$B = \frac{g}{\omega^2 * \cos \phi_{xk}} * \sin(\alpha_C + \delta_C + \phi_{xk} - \xi - \frac{\pi}{2}).$$

Zakładając, że dla $\omega * t = 0$ obowiązują relacje:

$$\frac{d^2 s}{d(\omega * t)^2} = 0 \quad ; \quad \frac{ds}{d(\omega * t)} = 0$$

wówczas stosując przekształcenie Laplace'a

$$\mathbb{L} * (S^2 + 2 * \mu_{xk} * S - 1) = -A * \frac{S}{S^2 + 1} + B * \frac{1}{S^2 + 1} + \frac{C}{S}$$

można obliczyć obraz $\mathbb{L}$ i rozłożyć go na ułamki proste:

$$\mathbb{L} = \frac{S^2 * (C - A) + S * B + C}{S * (S^2 + 1) * (S^2 + 2 * \mu_{xk} * S - 1)} = \frac{a_1}{S} + \frac{a_2 * S}{S^2 + 1} + \frac{a_3}{S^2 + 1} + \frac{a_4}{S - \lambda_1} + \frac{a_5}{S - \lambda_2}$$

przy czym λ_1 i λ_2 są rozwiązaniem równania:

$$S^2 + 2 * \mu_{xk} * S - 1 = 0,$$

a współczynniki $a_1, \dots, a_5$ można wyliczyć z jednomianów zawierają-

cych kolejne potęgi $S^0, \dots, 4$; tzn.

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 0$$

$$2\mu_{xk} a_1 + 2\mu_{xk} a_2 + a_3 - \lambda_2 a_4 - \lambda_1 a_5 = 0$$

$$-a_2 + 2\mu_{xk} a_3 + a_4 + a_5 = C - A$$

$$2\mu_{xk} a_1 + a_3 - \lambda_2 a_4 - \lambda_1 a_5 = B$$

$$-a_1 = C$$

W rezultacie otrzymuje się:

$$\lambda_1 = -\mu_{xk} - \sqrt{1 + \mu_{xk}^2},$$

$$\lambda_2 = -\mu_{xk} + \sqrt{1 + \mu_{xk}^2},$$

$$a_1 = -C,$$

$$a_2 = \frac{1}{2} (A - \mu_{xk} B) \frac{1}{1 + \mu_{xk}^2},$$

$$a_3 = \frac{1}{2} (-\mu_{xk} B - A) \frac{1}{1 + \mu_{xk}^2},$$

$$a_4 = \frac{a_3 - \lambda_2 (a_1 + a_2)}{2 \sqrt{1 + \mu_{xk}^2}},$$

$$a_5 = \frac{\lambda_1 (a_1 + a_2) - a_3}{2 \sqrt{1 + \mu_{xk}^2}}.$$

Stosując w odniesieniu do $\mathbb{L}$ przekształcenie odwrotne do przekształcenia Laplace'a otrzymuje się szukaną funkcję $s(\omega * t)$ stanowiącą rozwiązanie wyjściowego równania różniczkowego:

$$\begin{aligned} s(\omega * t) = & a_1 + a_2 \cos(\omega * t) + a_3 \sin(\omega * t) + \\ & + a_4 \exp(\lambda_1 \omega * t) + a_5 \exp(\lambda_2 \omega * t). \end{aligned}$$

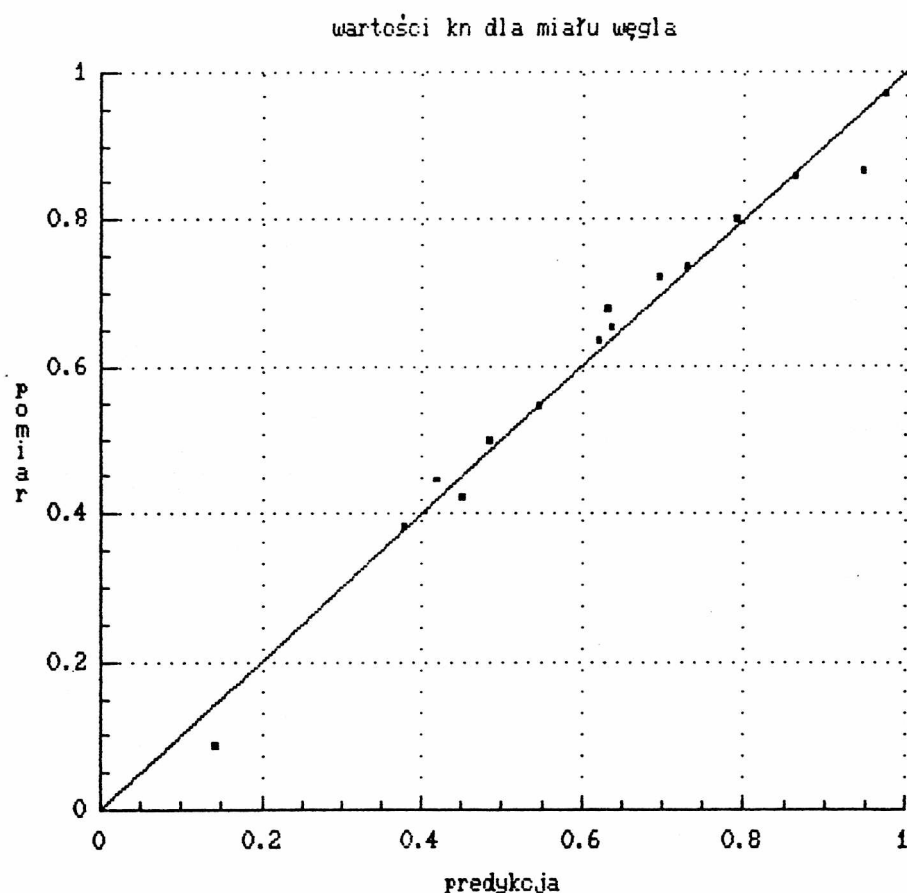
Zmienna niezależna	b	błąd stand.	t	alfa
STAŁA	0.899609	0.041921	21.4597	0.0000
kt*e	1.195083	0.070142	17.0380	0.0000
e*kw	-1.213293	0.051181	-23.7061	0.0000

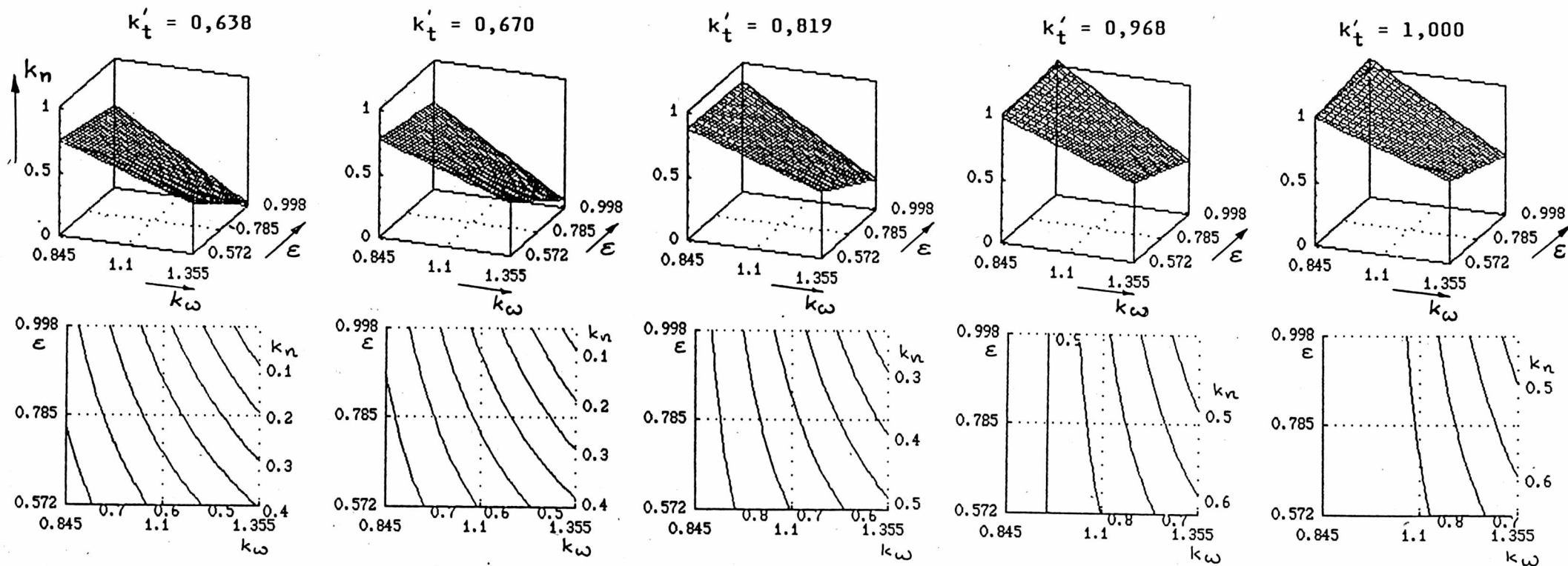
R² = 0.9763 Błąd stand. = 0.035242

Analiza wariancji dla pełnej regresji

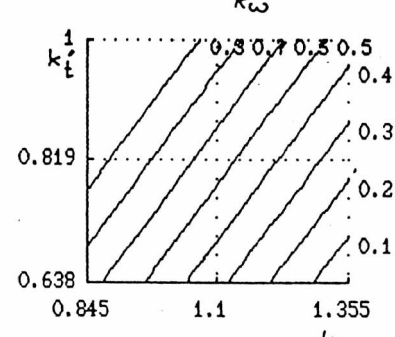
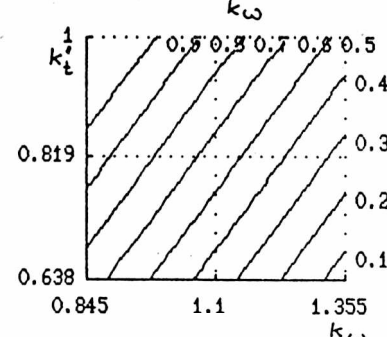
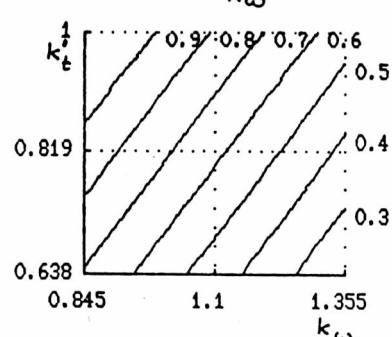
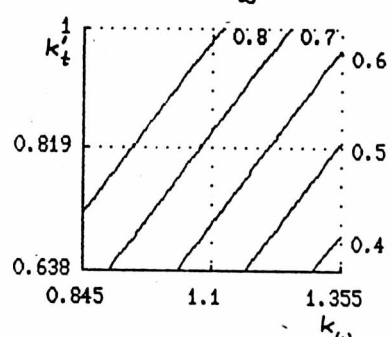
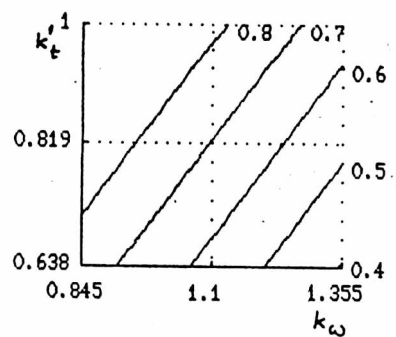
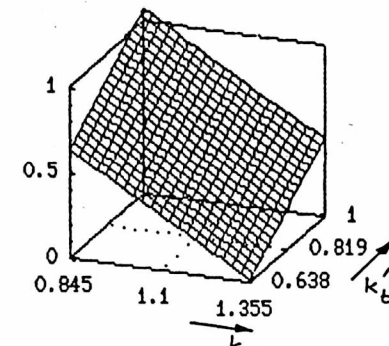
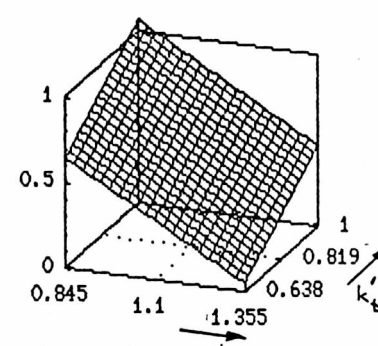
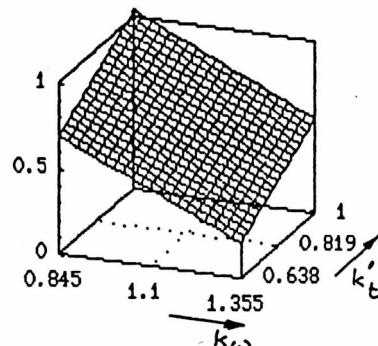
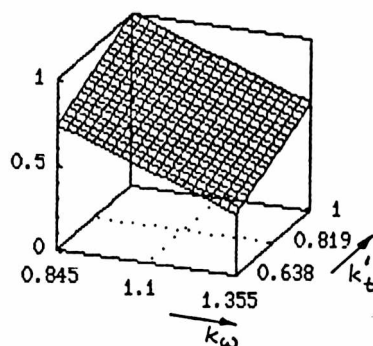
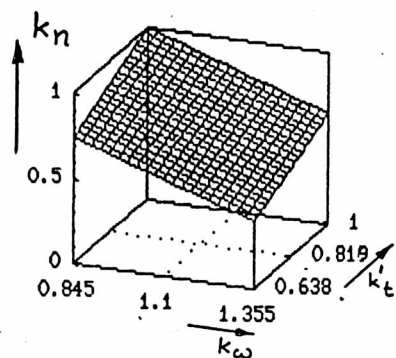
Źródło	Suma kwadratów	f	Średni kwadrat	F	P
Model	0.718177	2	0.359089	289.129	.0000
Błąd	0.0149036	12	0.00124197		

Całość 0.733081 14
R-kwadrat = 0.97967 Błąd standardowy estymacji = 0.0352

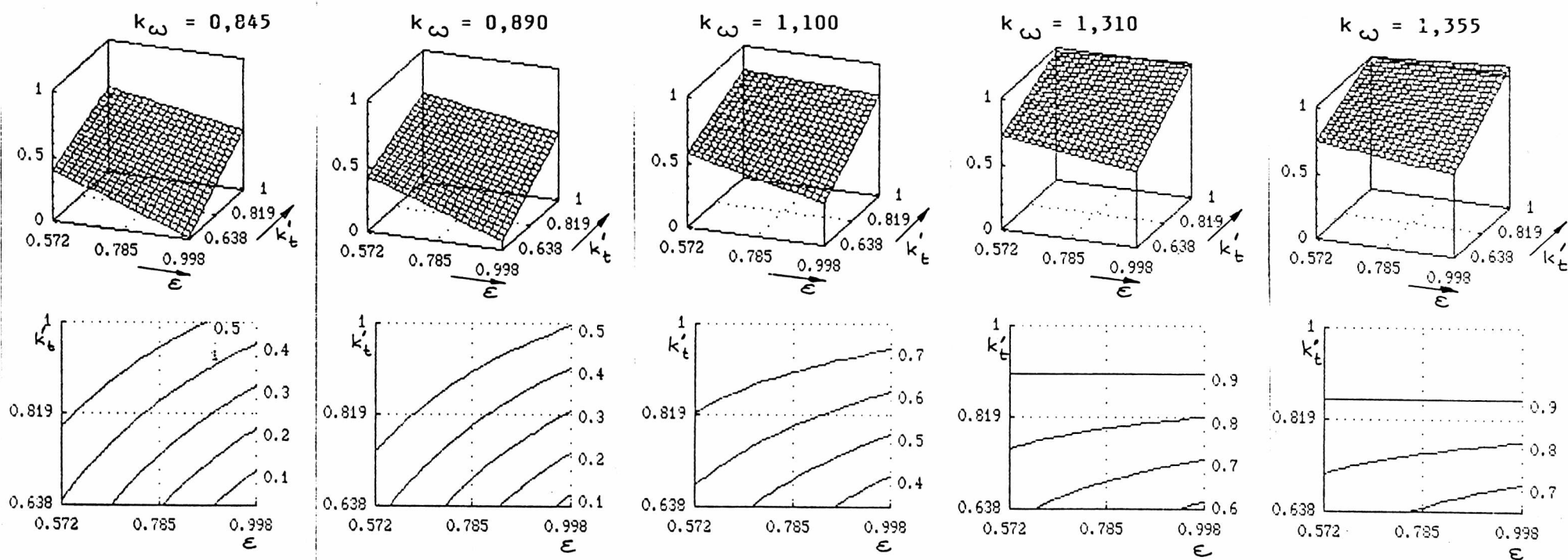




Wykresy przestrzenne i warstwiczne wielomianu aproksymującego $k_n = F(k_t = \text{const}, k_\omega)$ dla wybranych wartości centralnych k_t . Materiał: miał węgiel kamienny.

$\varepsilon = 0,572 \text{ rad}$ $\varepsilon = 0,610 \text{ rad}$ $\varepsilon = 0,785 \text{ rad}$ $\varepsilon = 0,960 \text{ rad}$ $\varepsilon = 0,998 \text{ rad}$ 

Wykresy przestrzenne i warstwikowe wielomianu aproksymującego $k_n \theta(k_t, k_\omega)$ dla wybranych wartości centralnych. Materiał: miał węgiel kamienny.



Wykresy przestrzenne i warstwiczne wielomianu aproksymującego $k_n = F(k_t, \epsilon, k_\omega = \text{const})$ dla wybranych wartości centralnych k_ω . Materiał: miał węgiel kamienny.

Zmienna niezależna	b	błąd stand.	t	alfa
STAŁA	-36.854405	1.690321	-21.8032	0.0000
kt	62.638917	1.74282	35.9411	0.0000
e*kw	3.48944	1.016583	3.4325	0.0050

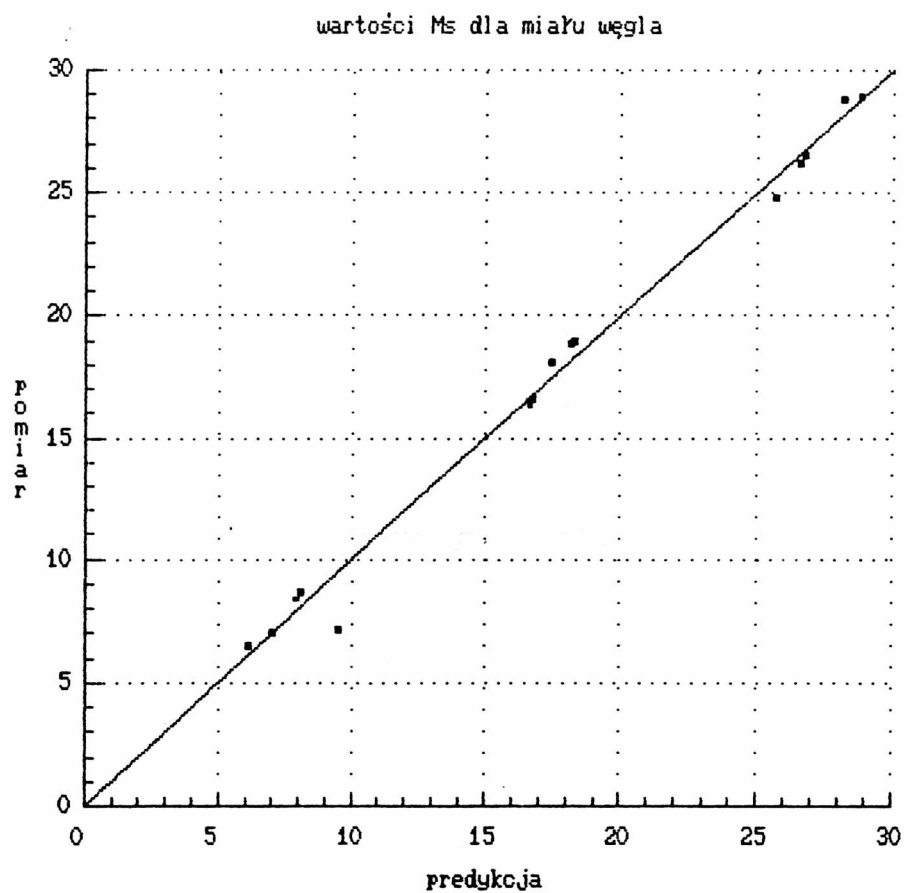
R² = 0.9894 Błąd standardowy = 0.859354

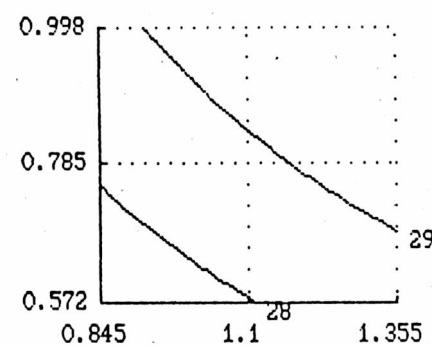
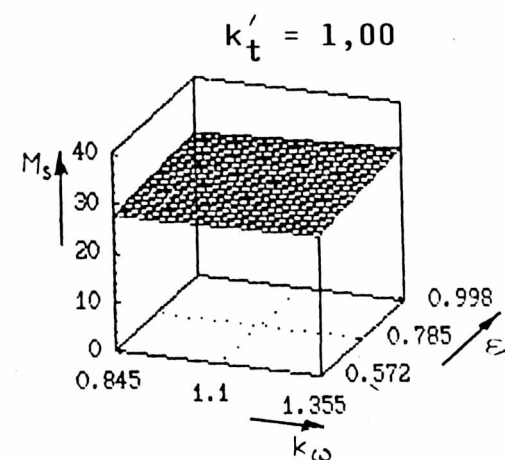
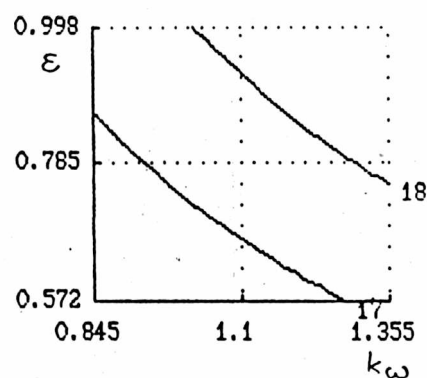
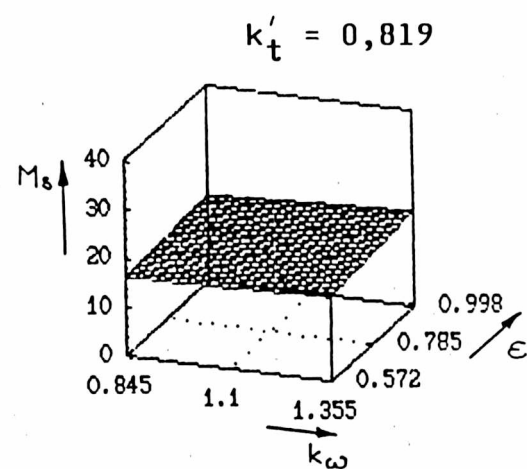
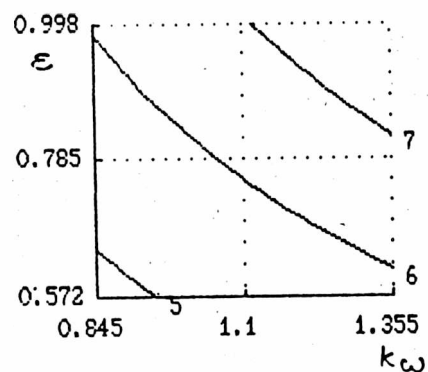
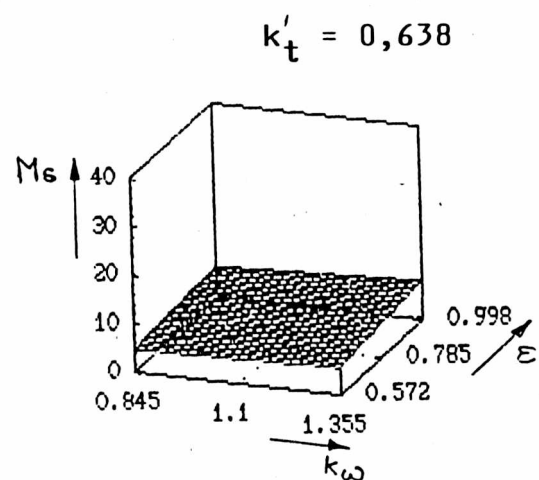
Analiza wariancji dla pełnej regresji

Źródło	Suma kwadratów	f	Średni kwadrat	F	P
Model	962.654	2	481.327	651.773	.0000
Błąd	8.86186	12	0.738489		

Całość 971.516 14

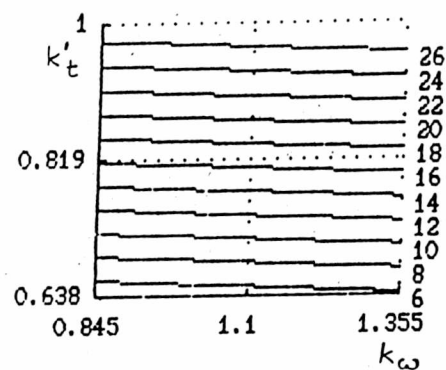
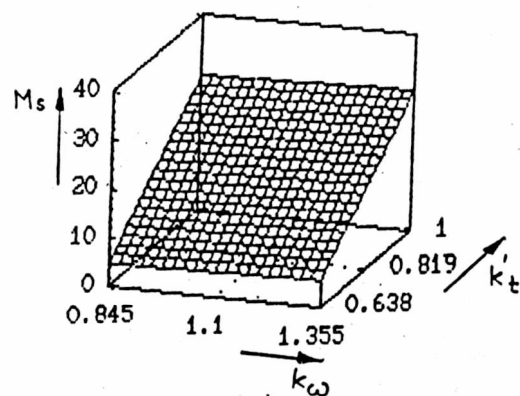
R-kwadrat = 0.990878 Standardowy błąd estymacji = 0.859354



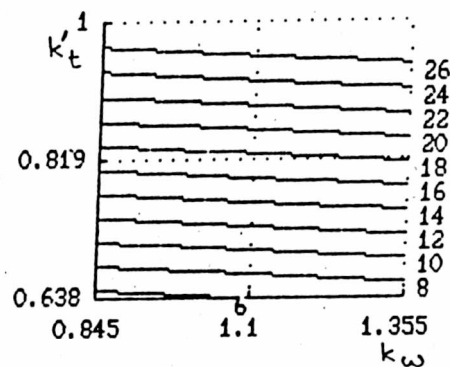
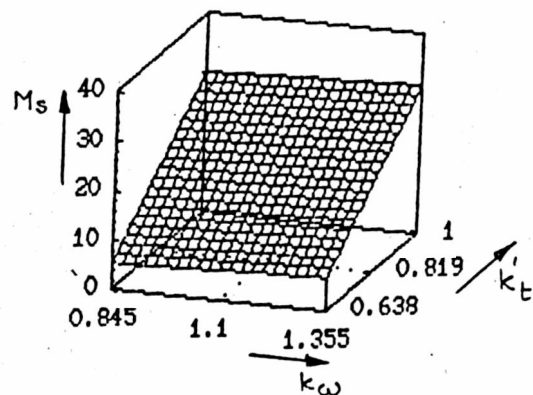


Wykresy przestrzenne i warstwiczne wielomianu aproksymującego $M_s = F(k'_t = \text{const.}, \epsilon, k_\omega)$ dla wybranych wartości centralnych k'_t . Materiał: miał węgla kamiennego ($\rho_u = 814 \text{ kg/m}^3$).

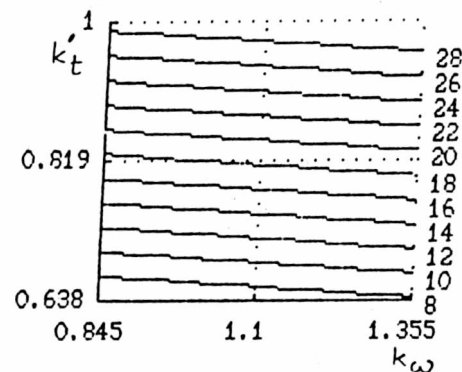
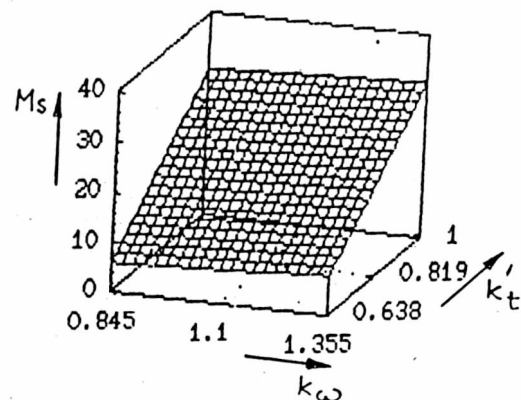
$$\varepsilon = 0,572 \text{ rad}$$



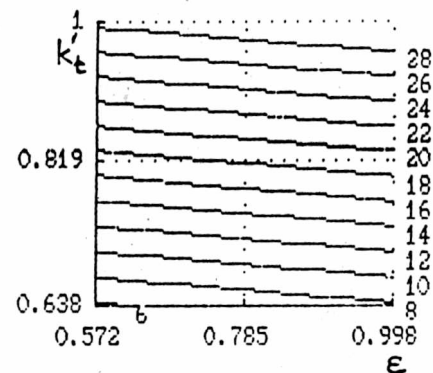
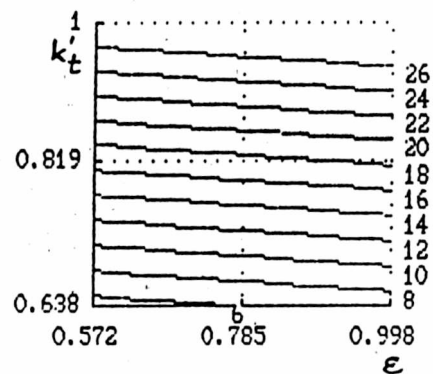
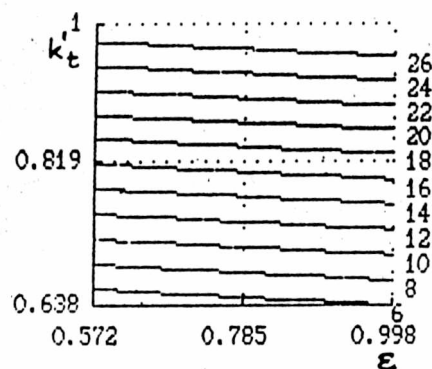
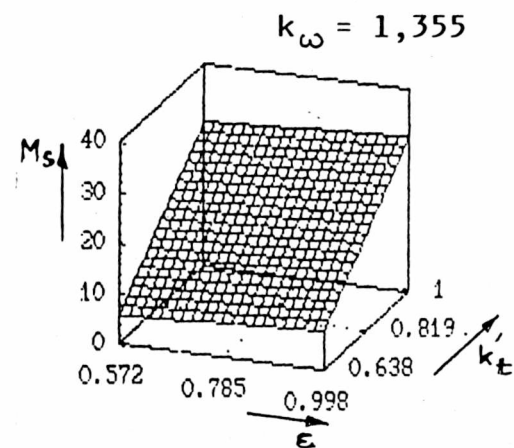
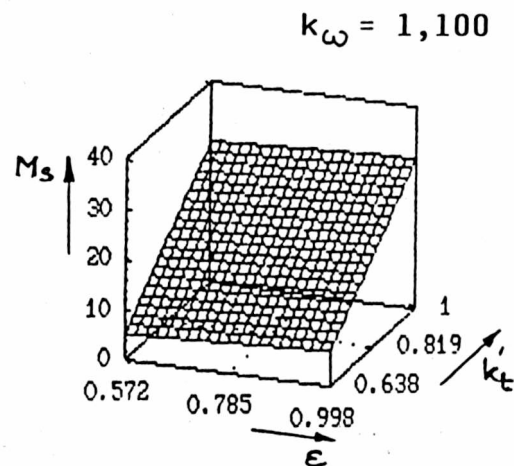
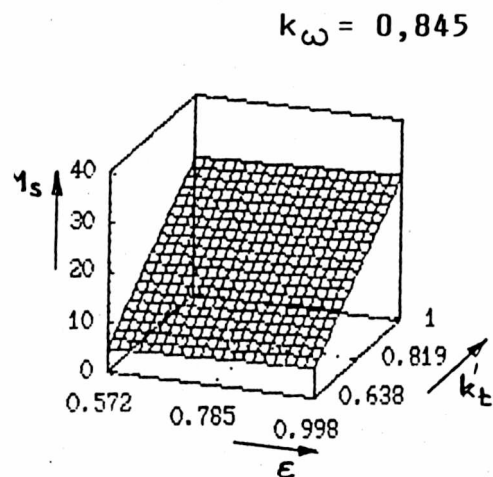
$$\varepsilon = 0,785 \text{ rad}$$



$$\varepsilon = 0,998 \text{ rad}$$



Wykresy przestrzenne i warstwiczne wielomianu aproksymującego $M_s = F(k'_t, \varepsilon = \text{const.}, k_\omega)$ dla wybranych wartości centralnych ε . Materiał: miał węgla kamiennego ($\rho_u = 814 \text{ kg/m}^3$).



Wykresy przestrzenne i warstwiczne wielomianu aproksymującego $M_s = F(k'_t, \epsilon, k_{\omega} = \text{const.})$ dla wybranych wartości centralnych k_{ω} . Materiał: miał węgla kamiennego ($\rho_u = 814 \text{ kg/m}^3$).

ZAŁĄCZNIK 3

Wyniki pomiarów wartości kąta α_0 [°]

Czerpak III. Materiał: granulát polistyrenu.

Statystyki	ω [rad/s]		
	5,55	6,78	7,40
Wartości zmiennej losowej $\bar{\alpha}_0$ [°]	95, 87, 95, 89, 97, 102, 100, 91, 86, 84, 93, 92, 91, 98, 89, 94, 95, 96, 81, 92.	88, 86, 96, 83, 82, 87, 78, 96, 75, 91, 71, 88, 89, 89, 84, 80, 79, 88, 86, 90.	77, 76, 82, 60, 84, 85, 84, 93, 69, 85, 71, 82, 87, 80, 63, 73, 74, 77, 76, 65.
Liczność próby n	20	20	20
Średnia $\bar{\alpha}_0$	92,4	85,3	77,3
Mediana	92,5	86,5	78,0
Wariancja	28,24	41,38	73,59
Odchyl. stand.	5,31	6,43	8,58
Wartość minimalna	81	71	60
Wartość maksymalna	102	96	93
Zakres	21	25	33

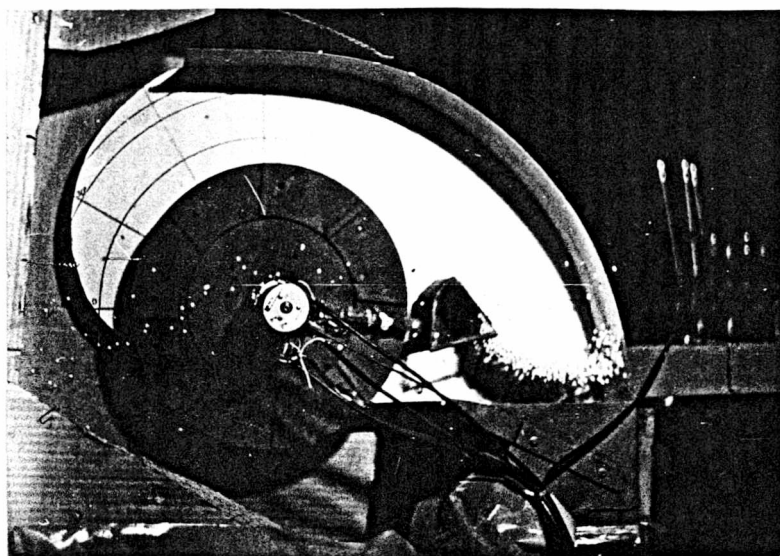
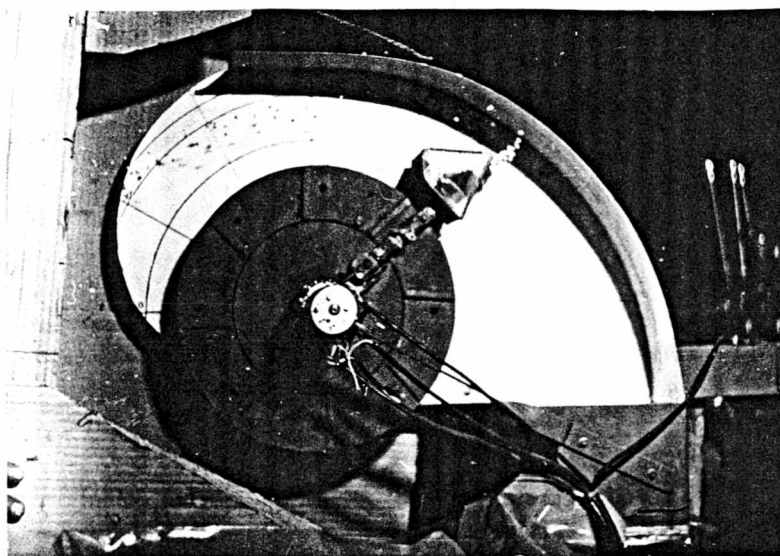
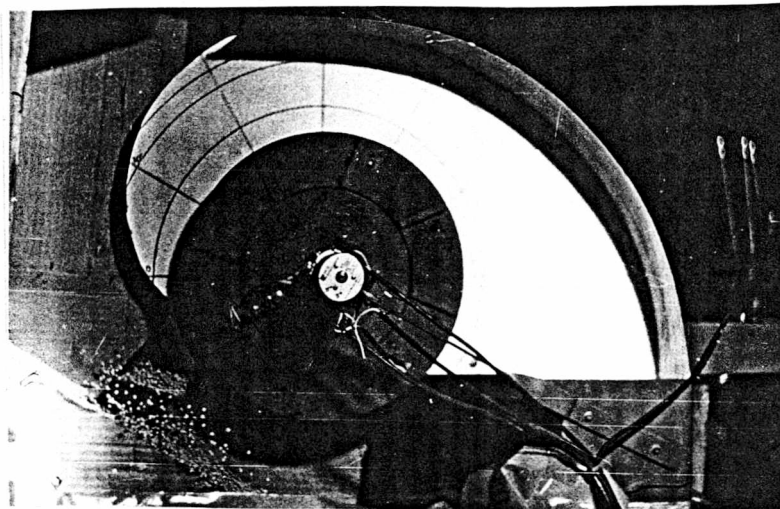
Średnie wartości kątów charakterystycznych procesu przeładunku $\bar{\alpha}_0(\text{śr})$ i $\bar{\alpha}_k(\text{śr})$ [rad] oraz ich odchylenia standardowe $s(\alpha_0)$ i $s(\alpha_k)$ dla czerpaka III.

	granulat polistyr		miel węglowy		żwir sortowany	
ω [rad/s]	$\bar{\alpha}_0(\text{śr})$	$\bar{\alpha}_k(\text{śr})$	$\bar{\alpha}_0(\text{śr})$	$\bar{\alpha}_k(\text{śr})$	$\bar{\alpha}_0(\text{śr})$	$\bar{\alpha}_k(\text{śr})$
n [1/min]	$s(\alpha_0)$	$s(\alpha_k)$	$s(\alpha_0)$	$s(\alpha_k)$	$s(\alpha_0)$	$s(\alpha_k)$
5,55	1,613	2,777	1,634	3,016	1,590	2,745
53,0	0,093	0,114	0,128	0,155	0,110	0,144
6,78	1,489	2,704	1,573	3,028	1,539	2,871
64,7	0,112	0,125	0,141	0,125	0,126	0,107
7,40	1,349	2,646	1,522	3,094	1,557	2,934
70,7	0,150	0,110	0,159	0,146	0,117	0,130

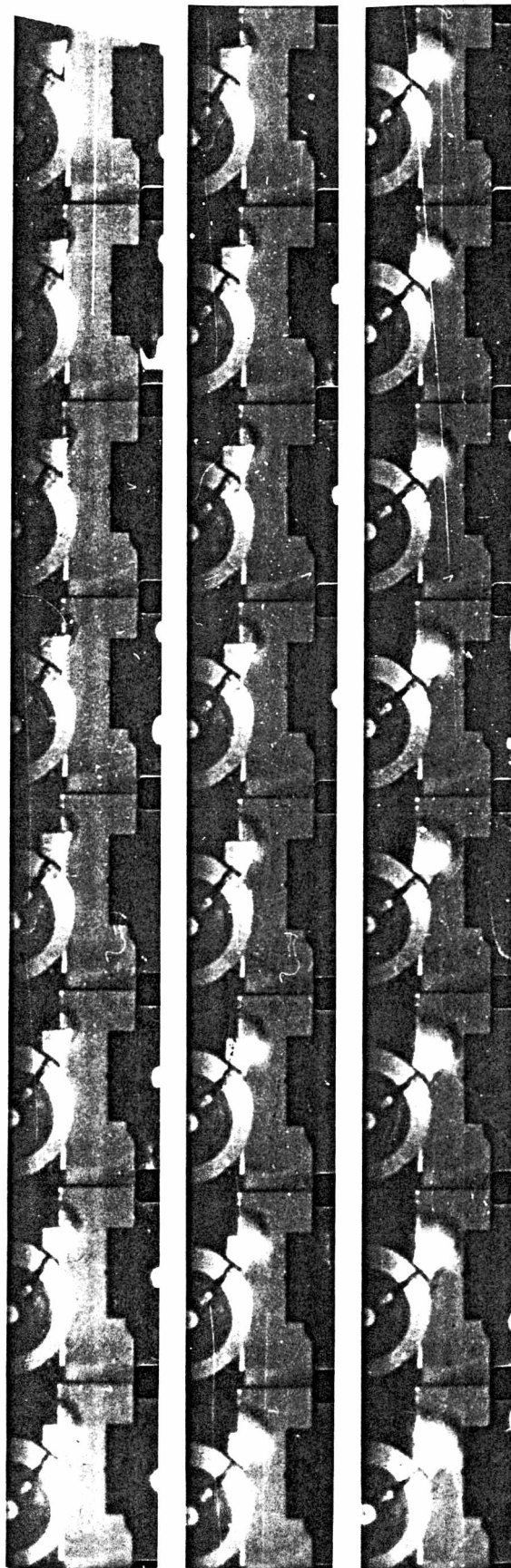
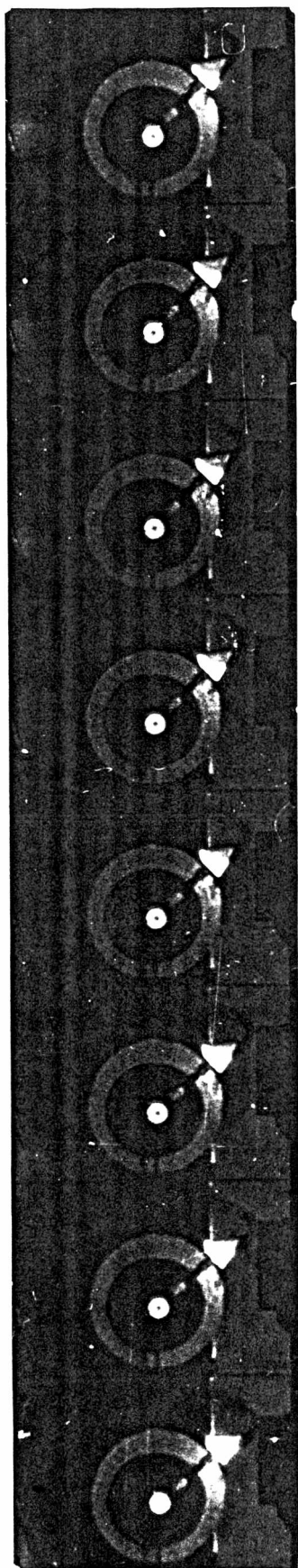
Wyniki pomiaru gęstości usypowej materiałów ziarnistych użytych w badaniach eksploatacyjnych.

	granulat polistyrenu	miał węgla kamiennego	żwir sortowany
ρ_u $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	703	820	1407
	698	804	1438
	695	818	1407
	694	815	1420
	704	827	1392
	700	798	1398
	693	803	1430
	700	821	1415
	694	822	1412
$\bar{m}$	698	814	1413
$s(m)$	4	10	15
ρ_u	698 $\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$ 4	814 $\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$ 10	1413 $\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$ 14

ZALĄCZNIK 4



Przykładowe fotogramy procesu roboczego czerpaka.



Wysyp odśrodkowy. Materiał: miał węgla kamiennego.
a/ - czerpak III, b/ - czerpak IV.