

15 dni

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

Rozprawy
nr 42

JÓZEF FLIZIKOWSKI

Badania i podstawy konstrukcyjne
wielotarczowych rozdrabniaczy
nasion

2/3

owski, Józef (1951-
iaia i podstawy konstr

BYDGOSZCZ - 1990

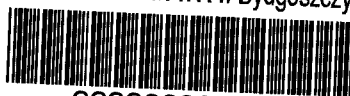
AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

Rozprawy
nr 42

JÓZEF FLIZIKOWSKI

**Badania i podstawy konstrukcyjne
wielotarczowych rozdrabniaczy
nasion**

Biblioteka Główna ATR w Bydgoszczy



00000005372

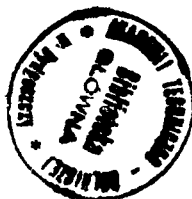
BYDGOSZCZ – 1990

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
prof. dr hab. Ojcumiła Stefaniak

OPINIODAWCY
prof. zw. dr hab. Józef Grochowicz
doc. dr hab. Andrzej Kwieciński

REDAKTOR NAUKOWY
prof. dr hab. inż. Józef Szala

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Halina Kluczyńska, Zbigniew Gackowski



Wydano za zgodą Rektora
Akademii Techniczno-Rolniczej
w Bydgoszczy

ISSN 0209-0597

**WYDAWNICTWO UCZELNIANE AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ
W BYDGOSZCZY**

Wyd. I. Nakład 150 egz. Ark. aut. 4,9, ark. druk. 5. Papier kl. III
Oddano do druku w czerwcu 1990 r. Druk ukończono w sierpniu 1990 r.
Prasowe Zakłady Graficzne RSW „Prasa-Książka-Ruch” w Bydgoszczy, ul. Dworcowa 13.
Zamówienie nr 1865/90.

Spis treści

	str.
Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
WSTĘP	7
1. AKTUALNY STAN BADAŃ	8
1.1. Prace eksperymentalne	11
1.2. Prace teoretyczne	12
1.3. Elementy podstaw konstrukcyjnych budowy maszyn do rozdrabniania	13
2. CEL PRACY I HIPOTEZY	21
2.1. Wytyczne do badań	21
2.2. Sformułowanie problemu	22
2.3. Cel pracy	22
2.4. Hipotezy badawcze	22
3. WARUNKI BADAŃ	23
3.1. Przyrząd do badania cięcia pojedynczych nasion	23
3.2. Stanowisko badawcze	24
3.2.1. Rozdrabniacz	25
3.2.2. Przekładnia	28
3.3. Rozważania nad modelem i oceną procesu rozdrabniania oraz zakres badań w przyjętych warunkach	29
3.4. Materiały stosowane w badaniach	35
3.5. Miejsce realizacji badań i obliczeń	35
4. METODYKA BADAŃ	37
4.1. Schemat eksperymentu	37
4.2. Metodyka badań wstępnych i zasadniczych	38
4.3. Metodyka badań nad cechami wytrzymałościowymi i właściwościami ziaren	43
4.4. Metodyka badań i kryteria oceny zespołu roboczego rozdrabniacza	44
4.5. Metodyka badań przekładni	45
4.6. Metodyka rejestracji wyników i obliczeń	45
4.7. Metodyka badań porównawczych	48

	str.
5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA	49
5.1. Zestawienie wyników badań	49
5.2. Zależność pracy odkształcenia trwałego od rodzaju ziarna i prędkości zadawania obciążeń	51
5.3. Zależność naprężeń od rodzaju ziarna i prędkości zadawania obciążeń	55
5.4. Wyniki badań nad procesem rozdrabniania	58
5.5. Wyniki badań nad energetyką rozdrabniania	64
5.6. Wyniki badań układu napędowego i ocena energetyczna	68
6. WYBRANE CECHY KONSTRUKCYJNE WIELOTARCZOWEGO ROZDRABNIACZA ZIAREN ZBÓŻ	73
7. WNIOSKI	79
LITERATURA	81
Streszczenia	93

Wykaz ważniejszych oznaczeń

C	- macierz wielkości stałych,
C_k	- cechy konstrukcyjne,
d_g	- średnia wielkość cząstek, mm,
d_i	- średnica otworów przepustowo-rozdrabniających, mm,
D_k	- średnica koła napędowego, mm,
e_R	- wskaźnik energetycznej efektywności rozdrabniania,
E	- wskaźnik sprężystości, N/m^2 ,
E_c	- energia całkowita dostarczana do układu rozdrabniającego, J,
E_o	- energia rozdrabniania ogółem, J,
E_s	- energia pobierana przez silnik, J,
E_p	- energia wyjścia przekładni mechanicznej, J,
E_R	- energia na rozdrabnianie, kJ/kg,
$E_{R\lambda}$	- energia na wale rozdrabniacza, kJ/kg,
$E_{T\lambda}$	- energia zużywana na rozdrabnianie w warunkach modelu, kJ/kg,
E_{ST}	- energia przeznaczona na sterowanie, J,
h_i	- wymiary płaskowników, m lub mm,
i_d	- przełożenie dynamiczne,
i_k	- przełożenie kinematyczne,
l_i	- długość członów w przekładni impulsowej, mm,
L	- praca na rozdrabnianie, kJ/kg,
m	- masa produktu, kg,
m'	- strumień masy w czasie, kg/s,
M	- moment obrotowy - stopień mialkości, Nm - mm,
M_1	- moment obrotowy na wale wejściowym, Nm,
M_2, M_r	- moment obrotowy na wale wyjściowym, moment obrotowy na wale rozdrabniacza, Nm,
n	- prędkość obrotowa, min^{-1} ,
N	- moc w układzie badanym, W,
P	- praca odkształcenia (w wydrukach komputerowych), kJ/kg,
q	- indeks quasi-ścianiania,
s_i	- szczelina między tarczami, mm,
t	- czas próbkowania, ms,
v_r	- prędkość liniowa elementu rozdrabniającego, m/s,
w	- wilgotność, %,
W_1	- wydajność masowa procesu, kg/s,
x, y	- symbole zmiennych,
α	- kąt cięcia - poziom istotności, $^\circ$, rad - -
β	- kąt przyłożenia, $^\circ$, rad,
γ	- kąt ostrza, $^\circ$, rad,

- Δ - stopień nierównomierności biegu, -, %,
- Δ_k - stopień nierównomierności kinematycznej, -, %,
- Δ_d - stopień nierównomierności dynamicznej, -, %,
- Δ_v, Δ_r - stopień nierównomierności ruchu, -, %,
- η - sprawność mechaniczna, -, %,
- η_o - sprawność ogólna rozdrabniania, -, %,
- φ - kąt obrotu wału wyjściowego przekładni i rozdrabniacza, rad,
- Φ - średnica otworów, mm lub m,
- λ - wskaźnik stopnia rozdrobnienia,
- μ - współczynnik tarcia,
- ψ - kąt obrotu wału wyjściowego - współczynnik wypełnienia, rad - -,
- ω - prędkość kątowa, rad/s,
- ω_1 - prędkość kątowa wału wejściowego przekładni i silnika, rad/s,
- ω_2 - prędkość kątowa wału wyjściowego, rad/s,
- ω_m - prędkość kątowa średnia, rad/s.

WSTĘP

Jakość rozdrabniania wymaga systematycznego prowadzenia badań w kierunku obniżania zużycia energii, racjonalizacji wydajności, a przede wszystkim zachowania i podwyższania dobrych właściwości produktu przetwórstwa.

Piętrzące się trudności podczas rozwiązywania problemów związanych ze stosowaniem w przemyśle paszowym i spożywczym rozdrabniaczy bijakowych wywołują konieczność poszukiwania konstrukcyjnych rozwiązań alternatywnych, które umożliwiają rozdrabnianie materiału na poziomie niskiego zużycia energii, małych strat wartościowego materiału, przy niskich prędkościach liniowych elementów rozdrabniania.

Możliwości doskonalenia istniejących rozdrabniaczy są ograniczone. Występują tylko w zakresie warunków racjonalnego użytkowania, napraw występujących uszkodzeń, sposobów sterowania technologią przetwórstwa oraz modernizacją elementów roboczych.

Zasadniczo podwyższenia jakości rozdrabniania należy spodziewać się głównie po innowacyjnych rozwiązaniach konstrukcyjnych.

Wprowadzenie w roku 1985 nowej generacji wielotarczowych rozdrabniaczy nasion, działających na zasadzie quasi-ścianania wielokrawędziowego w przestrzeni wielootworowej, wywołało konieczność opracowania specyficznego zakresu podstaw konstrukcyjnych ich budowy. Do podstawowych zadań zmierzających w tym kierunku należy zaliczyć: wyznaczenie pracy odkształcenia trwałego i naprężeń podczas quasi-ścianania nasion, określenie charakterystyk ruchowych układu napędowego stosowanego do uzyskania niskiego zakresu prędkości kątowej wału rozdrabniacza, zaproponowanie i zweryfikowanie doświadczalne nowej techniki obliczeń dla chwilowej powierzchni rozdrabniania w wielootworowym pakiecie tarcz.

Dodatkowego znaczenia nabiera możliwość zaproponowania miar jakości rozdrabniania, opartych na relacjach energetycznych: efektów uzyskanych dzięki rozdrabnianiu i nakładów poniesionych na ich uzyskanie.

1. AKTUALNY STAN BADAŃ

Trudności występujące podczas teoretycznych badań procesu rozdrabniania powodują, że wyrażane są poglądy: czy pełne rozwiązanie problemu - przy obecnie stosowanych założeniach - jest w ogóle możliwe [2, 3, 8, 36, 96]. Niemniej jednak istnieją i powstają nadal różne teorie rozdrabniania: Kicka, Rittingera, Bonda, Bracha, Rebindera, Schuberta, Schönerta, Schwedesa, Beke, Melnikowa, Gehrke'go, Kerlina, Pahla i inne statystyczne i fizykalne interpretacje zjawisk towarzyszących rozdrabnianiu [1, 3, 11, 22, 46, 66, 79, 96, 118, 119, 148]. Każda z tych teorii jest w zasadzie słuszna, jako opis w określonym zakresie zmienności czynników, dla przyjętych założeń - uproszczeń badawczych. W dalszym ciągu najwyższy poziom ogólności rozważań nad wywoływaniem odkształceń trwałych gwarantują podstawowe prawa wytrzymałości materiałów oraz jej ujęcie probabilistyczne.

Podstawy rozdrabniania należą do tych nielicznych już dziś dziedzin wiedzy, których cechy metodologiczne nie zostały do końca określone [2, 3, 8, 14, 36, 66, 79, 96, 111, 118, 130, 174]. Toteż ciągle są one przedmiotem wielu prac naukowych.

Przy pewnego typu interpretacjach rozdrabnianie nie jest niczym innym, jak zbiorem zasad na użytek praktyków, a wyprowadzonych z innych nauk technicznych [1, 96]. Według innej koncepcji rozdrabnianie miałoby być dziedziną teoretycznych dociekań z zakresu różnych dyscyplin, jak mechanika pękania, teoria systemów oraz fizjologia roślin [5, 11, 67, 70, 89, 96, 100, 103, 122, 130, 134]. Techniczny proces rozdrabniania jest wynikiem występowania złożonej grupy zjawisk i procesów dzielenia, które są przyporządkowane wielu dziedzinom wiedzy.

Ważniejsze elementy podstaw rozdrabniania zestawiono w tabeli 1. W górnej części tabeli 1 zgrupowano dziedziny mechaniki, które wiążą się bezpośrednio z podziałem materii, z jej zachowaniem przed, w czasie i po przetworzeniu lub przekształceniu. Występują tu również dyscypliny, które formułują potrzeby rozdrabniania, racje istnienia konstrukcji rozdrabniającej, sposoby wytwarzania ich elementów, eksploatacji maszyn i przetwórstwa. W środkowej części tabeli 1 zamieszczono grupę specyficznych eksperymentów prowadzonych na materiale, maszynie i podczas procesów rozdrabniania. Jako konsekwencję prowadzonych doświadczeń podano ważniejszy charakter do robku podstaw rozdrabniania w postaci istniejących tzw. praw rozdrabniania i opisów do prowadzenia symulacji cech konstrukcyjnych, właściwości materiału, parametrów procesu oraz zjawisk towarzyszących rozdrabnianiu.

Tabela 1.

Charakterystyka podstaw rozdrabniania

Podstawy rozdrabniania						
Mechanika pękania	Wytrzymałość materiałów	Kinematyka. Dynamika. Statyka	Mechanika płynów. Termodynamika. Mechanika ciał sypkich	Granulometria. Materiałoznawstwo. Gospodarka paszowa. Paszoznawstwo. Młynarstwo. Ekstruzja		
Podstawy konstrukcji maszyn Techniki wytwarzania elementów Podstawy eksploatacji maszyn Technologie przetwórstwa						
Prace eksperymentalne						
Wiele ziaren	Jedno ziarno	Model rozdrabniacza	Rozdrabniacz	Proces technologiczny	Próby wytrzymałościowe	Pęknięcie
Prace teoretyczne						
Równania rozdrabniania	Rachunek różniczkowy i całkowy	Prawa fizyki	Wzory. Nomogramy. Wykresy	Symulacja: - konstrukcji, - materiału, - procesu, - zjawiska		

Podstawy poznania i opisu pewnych zjawisk przy rozdrabnianiu mogą stanowić wybrane działy mechaniki. Przewidywanie rodzaju i przebiegu pęknięcia ziarna stało się częścią składową obliczeń wytrzymałościowych [100]. Jest to oczywiście obliczanie wyłącznie prawdopodobnego rodzaju dekohezji. Pęknięcie może przebiegać bowiem od łagodnie plastycznego do gwałtownie kruchego, czyli od powolnego do szybkiego zmęczenia [66, 96, 100]. Można tą drogą uzyskać informacje o rozdrabnianiu pod warunkiem, że zachowane są idealne stany modelu oraz niezmiennosc parametrów opisujących.

Współczesna mechanika ośrodków ciągłych podejmuje jedynie problemy struktury ośrodków izotropowych lub omawia niektóre proste przypadki materiałów ortotropowych, a więc ośrodków, które nie opisują materiałów rolniczych. Złożony i trudny do opisanego charakter materiałów ziarnistych wynika z nieciągłej (w sensie mechaniki ośrodka), komórkowej budowy i wielofazowej struktury, której każdy składnik reaguje na wpływy zewnętrzne, wreszcie - ze wspomnianej zmienności tych cech w czasie. Jeśli rozważyć najprostszy element struktury - komórkę roślinną - to z punktu widzenia fizyki ośrodka jest ona błoną sprężysto-plastyczną [13], wypełnioną mieszaniną cieczy i gazu. Nie istnieje dotychczas nawet przybliżone rozwiązanie problemu jej odkształcenia pod działaniem sił zewnętrznych, ani wymia-

ny ciepła i masy w procesie nagrzewania komórki. Stąd też opisy zjawisk fizycznych ograniczają się na ogół do zbioru elementów uważanego za ciało jednorodnie, bądź za konstrukcję złożoną z jednorodnych warstw [1, 13, 106].

Mechanika pozwala również na analizę zagadnień przeniesienia ruchu i stanu sił oraz opis związków między siłami a ruchem nasion i elementów rozdrabniających. Teoria zderzeń zajmuje tu szczególne miejsce. Dla przeanalizowania obciążeń cząstek materiału podczas rozdrabniania przez uderzenie swobodne stosuje się w pracach Barabaszki [3], Dmitrewskiego [20], Friedricha [60], Gehrke'go [66], Kerlina [96], Rumpfa [148, 149], Schuberta (za 96), Schönerta (wg 149), Pahla [132] i innych [127, 142, 147] zależności obowiązujące dla zjawisk zachodzących przy zderzeniu dwóch ciał.

Istnieje ponadto możliwość wykorzystania mechaniki do opisu przejścia materiału od kosza zasypowego rozdrabniacza, poprzez układ dzielący, aż do wyjścia produktu z maszyny [45, 66, 96].

Najczęściej, gdy zjawisko nie daje się analitycznie ująć, korzysta się z probabilistycznego opisu np. prawdopodobieństwo zniszczenia wiązań przy znanej charakterystyce obciążenia. Obliczenia prawdopodobnych skutków obciążeń są wystarczająco opisane przez Kocańdę, Szalę [100] oraz Kerlina [96].

Stan granulometryczny materiału rozdrabnianego przed i po procesie rozdrabniania oraz jednostkowe zużycie energii uważane są za wygodne estymatory procesu i maszyny rozdrabniającej [1, 53, 59, 66-79, 112, 162]. Najczęściej przedstawia się grupy cząstek jako masowy udział wielkości rozproszenia, przy czym wielkości rozproszenia zdeterminowane są metodą pomiarową, za pomocą której zostały określone. W czasie wieloletnich badań obliczono współczynniki funkcji rozkładu, takie same lub porównywalne, dla danej metody rozdrabniania. Do trzech znanych, typowych funkcji (log, RRS, wykładnicza) dochodzi duża liczba wieloparametrowych funkcji rozkładu, które mają ogólną ważność po sprowadzeniu do postaci funkcji dwuparametrowej [74, 96, 114, 128].

Jeżeli znany jest przebieg funkcji składu lub rozkładu ziarnowego, to występują możliwości wyznaczenia wielkości pozostałych charakterystyk: stopnia rozdrobnienia, miążkości, średnich wymiarów cząstek, ekstremalnych wymiarów, przyrostów powierzchni np. zmiany struktury, zmiany postaci geometrycznej, chropowatości. Wywodzące się stąd właściwości fizyczne i chemiczne wyznaczane są oddzielnie.

Bardzo ważnego znaczenia nabierają inne oceny wymierne, jak np. przyrost temperatury podczas przetwarzania oraz niewymierne, np. ocena wzrokowa. Przy rozdrabnianiu na paszę ostateczna weryfikacja procesu i produktu następuje w wyniku oceny strawności np. „in vitro” lub w bezpośrednim żywieniu zwierząt [26, 53, 151].

W opracowaniu podstaw konstrukcyjnych budowy nowych rozdrabniaczy, wyznaczeniu sprawności i energochłonności procesu rozdrabniania bardzo ważna jest informacja o obciążeniach i odkształceniach nasion podczas prób

wytrzymałościowych. Dla opisanego zjawisk towarzyszących rozdrabnianiu zakłada się, że materiał rozdrabniany charakteryzują właściwości wytrzymałościowe. Umożliwia to przeprowadzenie rozważań nad zaprojektowaniem sposobu zadawania odkształceń trwałych. Najczęściej właściwości te są nieznanne lub zmienne, korzysta się więc z tzw. parametrów materiałowych [96] lub tabel podatności na rozdrabnianie [79, 109, 111], bądź zakłada doświadczenie.

1.1. Prace eksperymentalne

Właściwości materiału rozdrabnianego, cechy konstrukcyjne rozdrabniacza oraz parametry procesu technologicznego są ustalone lub weryfikowane na podstawie eksperymentu. Do najczęściej spotykanych eksperymentów należy zaliczyć:

- doświadczenia na wielu ziarnach,
- doświadczenia na pojedynczych ziarnach,
- modelowanie rozdrabniacza,
- rozdrabnianie w warunkach rzeczywistej maszyny,
- modelowanie wybranych warunków technologii przetwórstwa,
- kombinacje wybranych doświadczeń.

Doświadczenia na wielu ziarnach, w mniej lub bardziej wyidealizowanych warunkach, dostarczają informacji o stanie sił i przemieszczeń podczas wywoływania odkształceń trwałych [49, 66, 96, 102] lub innych parametrów procesu, materiału bądź konstrukcji zespołu rozdrabniającego. Badania takie dostarczają informacji, czy przyjęta metoda wywoływania odkształceń trwałych nadaje się do realizacji procesu i sformułowanej potrzeby rozdrabniania, nie pozwalają natomiast na określenie związków przyczynowych wywołujących obserwowane zjawiska.

Możliwość badania fenomenów, np. poprzez rozdrabnianie pojedynczych ziaren, daje lepsze informacje i dane do wnioskowania przyczynowo-skutkowego, lecz nie pozwala opisać wpływu na rozdrabnianie wzajemnych oddziaływań materiału i produktu [41]. Ten typ doświadczeń nadaje się szczególnie do obserwacji rozwoju pęknięć ziaren w zależności od charakterystyki i warunków obciążeń. Określone zachowanie przy pękaniu może być przydatne przy ocenie procesu i projektowaniu rozdrabniania zadanego typu.

Zarówno doświadczenia na wielu, jak i na pojedynczych ziarnach dotyczą w większości zjawisk występujących w rozdrabniaczach bijakowych. Zjawiskom występującym w rozdrabniaczach walcowych i tarczowych poświęcono znacznie mniej prac. Boss [8] na specjalnym modelu rozdrabniacza weryfikował parametry podstawowych teorii rozdrabniania. Podobnie Jankowski [87, 88] zajmował się rozdrabniaczami walcowymi ustalając podstawowe cechy konstrukcyjne krawędzi roboczej. Prace, w których łączy się badania pojedynczych ziaren i grup ziaren z modelowym procesem maszynowym, należą do rzadkości. Gehrke [66] dokonał transpozycji wyników uzyskanych dla poje-

dynczych ziaren na warunki maszyny rozdrabniającej, a uzyskane rezultaty z badań maszynowych wykorzystał - z pozytywnym skutkiem - w prostej procedurze symulacji rozdrabniania.

Badania w warunkach technologicznych służą doskonaleniu poznania sumarycznych nakładów energii oraz optymalizacji jej zużycia [141, 161].

Wiele prac doświadczalnych poświęconych jest ciągle aktualnemu problemowi optymalizacji konstrukcji rozdrabniaczy. Dominującą grupę stanowią badania rozdrabniaczy bijakowych dla czynników:

- wynikających z budowy wirnika, tj. średnicy wirnika i prędkości obrotowej [66, 67, 77, 160], grubości bijaków [20, 60, 61, 96], kształtu części roboczej bijaków [20, 70, 76, 77, 79], liczby rzędów bijaków i ich rozmieszczenia na rozwinięciu wirnika [20, 60, 66, 67, 96], wielkości szczeliny roboczej [66, 127, 128, 160, 166];
- wynikających z konstrukcji obudowy wirnika, tj. obecności lub braku sita, rodzaju sita [20, 66, 128, 148, 160, 165], kształtu otworów w sicie [20, 79, 96, 148, 163], współczynnika prześwitu sita i kąta opasania sitem komory roboczej [148, 149, 160];
- dodatkowych, tj. sposobu wprowadzania surowca do komory rozdrabniająca [5, 20, 163], turborozdrabniania oraz obniżania temperatury surowców spożywczych podczas rozdrabniania [132].

1.2. Prace teoretyczne

Pierwsze próby matematycznego opisu zjawisk towarzyszących i będących rozdrabnianiem wystąpiły już w połowie minionego wieku [1, 2, 20, 148]. W pracach obliczeniowych nad rozdrabnianiem występuje kilka aspektów. Jednym z nich jest ustalenie funkcjonalnej zależności między zużyciem energii lub pracą rozdrabniania, a stopniem rozdrobnienia. Wynikające stąd wzory i prawa rozdrabniania pozwalają w pewnym przybliżeniu porównać zużycie energii potrzebnej do rozdrobnienia w zależności od rodzaju materiału i stopnia jego rozdrobnienia, rodzaju maszyny oraz przyjętego procesu technologicznego.

Drugim zagadnieniem jest ustalenie charakteru zmienności wymiarów cząstek rozdrobnionego materiału i wyprowadzenie odpowiednich zależności dla krzywych rozkładu wielkości cząstek.

Melnikow [20, 118] dokonał próby zaadaptowania ogólnych wzorów rozdrabniania (Rittingera, Kicka i Rebindera) do określenia pracy rozdrabniania nasion roślin pastewnych, z uwzględnieniem właściwości mechanicznych materiału oraz cech konstrukcyjnych bijaka (młotka) rozdrabniającego.

Innym aspektem obliczeń jest wykorzystanie dla potrzeb rozdrabniania istniejących zależności matematycznych (wyprowadzonych dla podobnych zjawisk w technice), np. wzory Hertza-Föppla [20]. Kolejnym sposobem opisu rozdrabniania są równania i zależności technologiczne, transmitacyjne oraz chemiczne [40, 41, 44].

Nie ma uniwersalnej metody obliczeniowej, o czym świadczy duża liczba opisów matematycznych. Istnieją jednak sposoby postępowania, które w zależności od przyjętych celów obliczeń pozwalają, z odpowiednim prawdopodobieństwem lub przybliżeniem, wyznaczyć wartości poszukiwanych parametrów.

Poznanie rozdrabniania wiąże się z budową i obserwacją modeli fizycznych rozdrabniania. Nie udało się do tej pory zbudować modelu fizycznego technicznego rozdrabniania. Podstawowe trudności wynikają ze złożonych zależności i wzajemnego wzmocnienia lub osłabiania sygnałów towarzyszących procesowi. Ulrich (wg 166) do opisu rozdrabniacza ze strumieniem powietrza próbował wykorzystać analogię wentylatora. We wnioskach wskazał, że wymiana impulsów podczas zderzeń użytecznych w decydujący sposób powoduje rozbieżności ilościowe i jakościowe modelu i obiektu. W ewentualnym przeniesieniu teorii wentylatora na maszynę rozdrabniającą znaczących trudności należy również spodziewać się w procesie wyznaczania podstawowych stałych obiektu [48, 55].

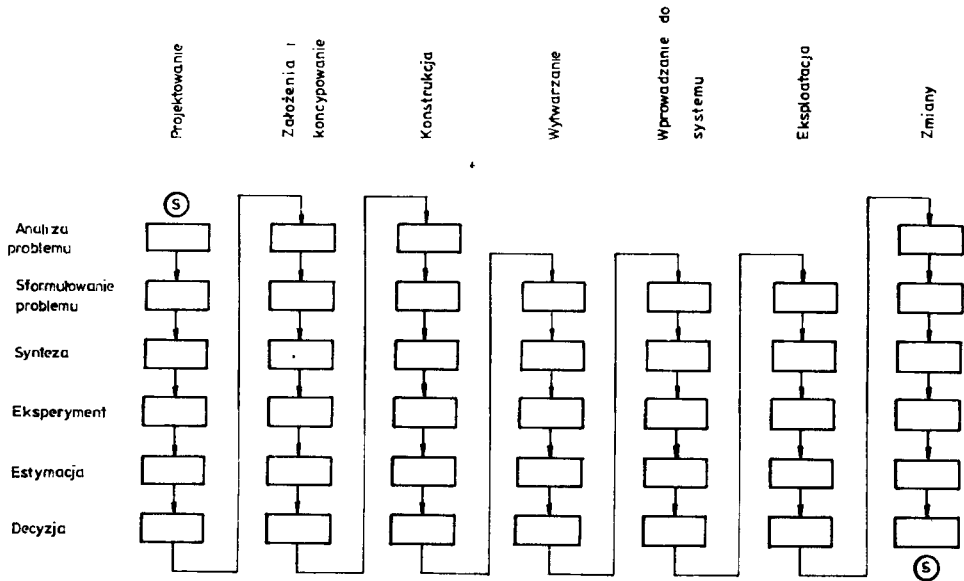
Znaczna liczba przebiegów fizycznych doprowadziła do tego, że nie każdy oddziałuje indywidualnie, ale i fizyczne widmo rozdrabniania jest wystarczającym wskaźnikiem procesu, konstrukcji lub materiału rozdrabnianego. Do miana takiego sumarycznego przebiegu można zaliczyć wybrane charakterystyki ruchowe: sprawność mechaniczną zespołów funkcjonalnych i napędowych, ich nierównomierność kinematyczną oraz dynamiczną [28, 31, 36, 37, 40, 44, 46, 47, 51].

W prezentacji prac obliczeniowych nie można pominąć dynamicznie rozwijających się technik modelowania i symulacji komputerowej [47, 96, 137]. Symulacja komputerowa pozwala na prowadzenie modelowego rozdrabniania według przyjętych sposobów postępowania. Można je realizować - dla zdarzeń opisanych z odpowiednim prawdopodobieństwem - według numeru przejścia ziarna; strumienia przepływu, charakterystyk obciążania i innych opisywanych zależności [49, 96], a nawet na podstawie cyfrowej analizy obrazu uzyskanego podczas filmowania procesu [132].

1.3. Elementy podstaw konstrukcyjnych budowy maszyn do rozdrabniania

Specyficzne elementy budowy i działania rozdrabniaczy wielotarczowych omówiono wcześniej w kilku publikacjach [36, 40, 41, 42, 44, 45, 49, 50, 53]. Zasadnicze działanie, zmierzające do rozwiązania sformułowanego problemu konstrukcyjnego, opiera się na istniejących naukowych podstawach tworzenia konstrukcji.

Istotę problemów podstaw konstrukcyjnych budowy maszyn i układów technicznych do rozdrabniania przedstawiono na rysunku 1 [41, 150].



Rys.1. Istota rozwiązywania problemów podstaw konstrukcji maszyn; projektowanie, założenia i koncyrowanie oraz konstrukcja rozdrabniacza wielotarczowego stanowią zadania pracy

Ogólna metoda konstruowania maszyn, w tym rozdrabniaczy, musi obejmować następujące fazy:

- projektowanie - jako plan rozwiązania potrzeby rozdrabniania,
- założenia i koncyrowanie - tworzenie podstaw istnienia systemu technicznego (w otoczeniu ekologicznym),
- konstrukcję - abstrakcyjny układ struktur zewnętrznych i wewnętrznych oraz przewidywanych stanów ruchu elementów rozdrabniania (materiału rozdrabnianego i elementów rozdrabniających),
- wytwarzanie - materializacja konstrukcji - proces konsumpcji materii, energii fizycznej i informacji,
- wprowadzanie do systemu - dystrybucja, doradztwo i sprzedaż - pierwsze miejsce weryfikacji poziomu rozpoznania potrzeb,
- eksploatację - użytkowanie maszyn zgodnie z zasadami przetwórstwa materiałów biologicznych, zasilanie podsystemu użytkowania i ewentualne naprawy - permanentne zużywanie energii fizycznej i materii,
- zmiany - wszystkie możliwe i uzasadnione operacje na planach zaspokajania potrzeb, konstrukcji, wytwarzaniu, eksploatacji, na materiale rozdrabnianym i procesie przetwórstwa, konsumpcji energii i materii; miejsce ingerencji wiedzy ekotechnicznej do funkcjonujących systemów inżynierskich.

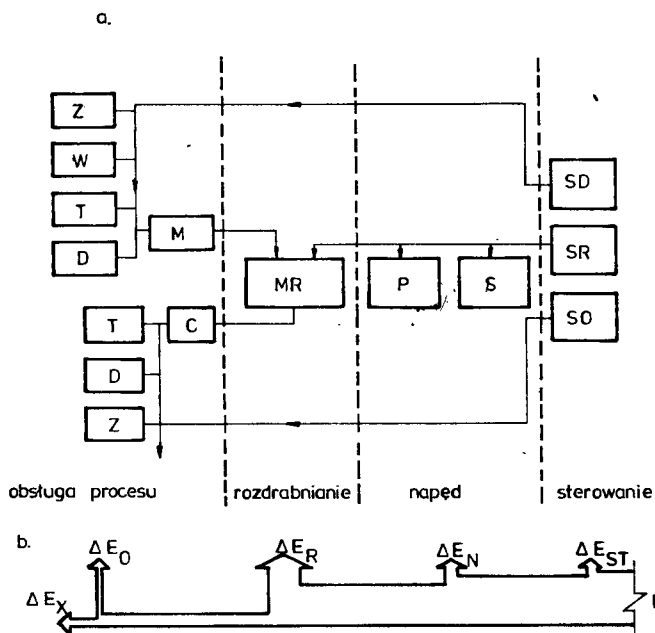
Główny zakres działań naukowo-badawczych, w ramach tworzenia podstaw budowy rozdrabniaczy wielotarczowych, skierowany był na podsystem: projektowania, definiowania założeń i koncyrowania nowych rozwiązań oraz identyfikację konstrukcji. Oczywiście jest, że w procesie identyfikacji konstruk-

cji uwzględnia się wszystkie pozostałe podsystemy istnienia i rozwoju rozdrabniaczy (rys.1).

W procesie tworzenia podstaw konstrukcyjnych budowy rozdrabniaczy, oprócz wielopłaszczyznowo uwarunkowanej analizy systemowej, występuje konieczność uwzględnienia złożoności technicznej układu do maszynowego rozdrabniania.

Układy techniczne do mechanicznego przetwórstwa nasion (rys.2) złożone są, w przypadku linii technologicznych o dużej wydajności, z następujących zespołów:

- sterowania dozowaniem masy do rozdrabniacza SD, rozdrabnianiem SR, odbiorem masy od rozdrabniacza SO;
- napędowego - silnika S, przekładni zmieniającej prędkość kątową i moment obrotowy w przedziale dostarczonej mocy P;
- rozdrabniającego - składającego się z maszyny lub zespołu maszyn rozdrabniających MR;
- pomocniczego - przenośników T, wybieraków W, separatorów M, cyklonów C, dozowników D, zbiorników Z.

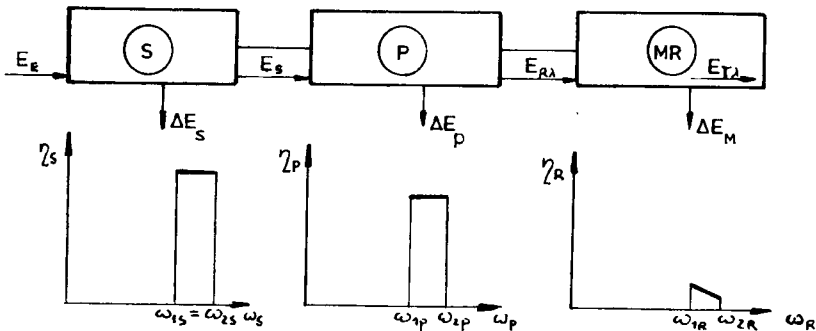


Rys.2. Układ techniczny do rozdrabniania materiałów ziarnistych: a - schemat blokowy; b - rozproszenie energii

Poziom niesprawności złożonego układu technicznego, w tym poszczególnych jego zespołów, wynika ze stanu cech konstrukcyjnych rozdrabniacza, układu napędowego i układów pomocniczych, poprawności doboru parametrów rozdrabniania, stanu technicznego poszczególnych zespołów, czasu analizy i warunków organizacyjnych oraz innych czynników zależnych. Na rysunku 2b

przedstawiono orientacyjne straty energii, które wiążą się z realizacją funkcji rozdrabniania oraz nieefektywnym rozproszeniem w układzie. Straty energii w układzie sterowania ΔE_{ST} są niewielkie, nakłady energetyczne na obsługę ΔE_0 zależą od poziomu mechanizacji i automatyzacji procesu, a udział rozprożeń wibroakustycznych ΔE_X zależy od rozwiązania konstrukcyjnego i stanu rozdrabniacza. Zasadniczych możliwości doskonalenia energetycznego należy spodziewać się w sposobie realizacji funkcji podziału materii oraz w przebiegach charakterystyk ruchowych układu napędowego. Jest to jednocześnie kolejne uszczegółowienie przestrzeni badań własnych.

Odosobniony układ napędowy składający się z silnika S, przekładni mechanicznej P oraz maszyny rozdrabniającej MR pokazano na rysunku 3. Jest to ogólny schemat blokowy stanowiska badawczego, służącego do określania i weryfikacji tworzonych modeli i konstrukcji rozdrabniacza.



Rys.3. Relacje w układzie napędowo-rozdrabniającym oraz przykładowe przebiegi sprawności jego elementów: S - silnik, P - przekładnia, MR - rozdrabniacz, E - energia, η - sprawność, ω - prędkość kątowa, ΔE - straty energii

Każdy element struktury funkcjonalno-napędowej charakteryzują potencjalne przebiegi sprawności w funkcji zmian prędkości kątowej silnika, przekładni i zespołu rozdrabniającego (dolna część rysunku 3). Sprawność silnika asynchronicznego S zależy od stosunku zapotrzebowania mocy na rozdrabnianie do mocy znamionowej silnika. Jeżeli wskaźnik ten przekracza wartość 0,50 - sprawność silnika stosowanego do napędu rozdrabniacza przekracza wartość 80 % [41, 62, 66, 118, 134].

Przebiegi charakterystyk ruchowych przekładni P zależą od przełożenia dynamicznego i kinematycznego oraz stanu cech konstrukcyjnych jej elementów [37, 39, 41]. Przekładnie bezstopniowe mogą, przy niekorzystnym układzie zmiennych, osiągać sprawność około 35 %.

Problem określania użytecznej pracy rozdrabniania materiałów ziarnistych w maszynie rozdrabniającej MR (rys.3), pomimo wielu opracowań badawczych, nie jest jeszcze wystarczająco opisany. Wiadomo, że decydującymi parametrami są wskaźniki rozdrabniania [8, 46, 76]. Ponadto na pracę rozdrabniania wpływają indywidualne cechy ziarna jako makro- i mikrostruktura, płaszczyzny łupliwości, kształt, obecność wewnętrznych rys i korbów,

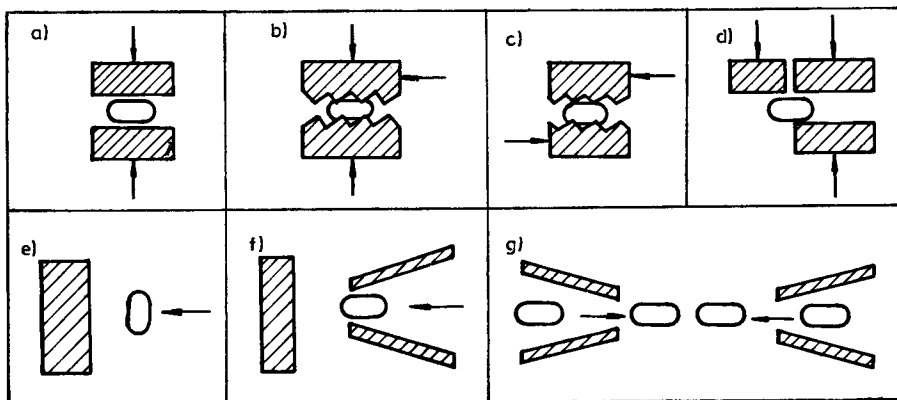
a także zawartość ciał obcych. Również oddziaływanie sił zewnętrznych jest przypadkowe. Z badań własnych oraz studiów literatury można przyjąć, że sprawność wywoływania odkształceń trwałych jest na poziomie do 2% [6, 8, 16, 36, 40, 46, 53, 79, 113, 132, 151, 171].

Odnosząc energię przeznaczoną na odkształcenie trwałe do energii rzeczywistej włożonej w techniczny układ do rozdrabniania można stwierdzić, że sprawność ogólna procesu maszynowego jest poniżej 1% i istotnie zależy od elementów układu technicznego.

W maszynach rozdrabniających używanych w przemyśle paszowym rozdrabnianie materiału ziarnistego następuje w wyniku (tabela 2): zgniatania (a), rozcierania (b) i (c), zgniania ze ścinaniem - określanego również jako quasi-ścinanie (d), rozbijania przez uderzenie bijakiem w strumieniu i przeciwstrumieniu (e), (f) i (g); oraz najczęściej jako złożenie wymienionych sposobów.

Tabela 2

Sposoby rozdrabniania surowców ziarnistych [146, 148]:
a - zgniatanie, b-c - rozcieranie, d - zgnianie ze ścinaniem, e-f-g - uderzenie



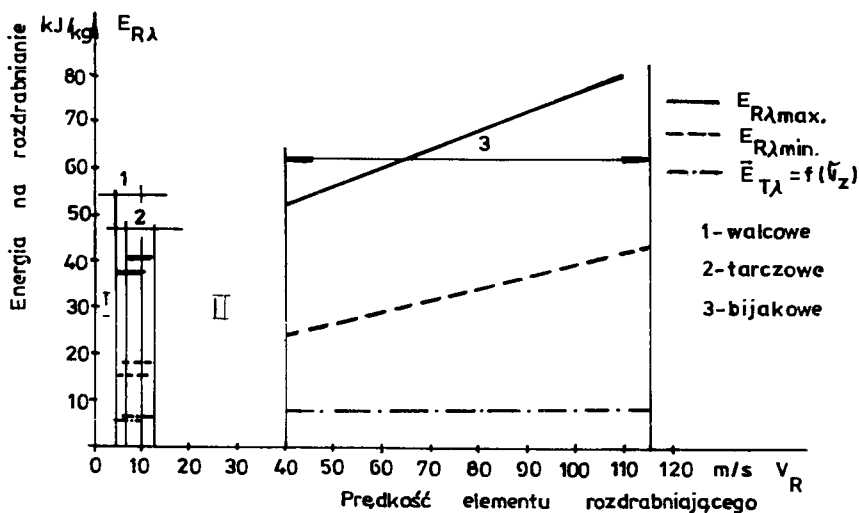
Zaprojektowanie zespołu rozdrabniającego jest tylko jednym z elementów procesu kształtowania skuteczności rozdrabniania; dobór zespołu napędowego o odpowiednich charakterystykach ruchowych ma również, dla energochłonności procesu, decydujące znaczenie.

Do tej pory nie badano wpływu charakterystyk układów napędowych na skuteczność rozdrabniania. W nowoczesnych rozdrabniaczach bijakowych nie ma żadnych przekładni, a napęd (często od dwóch silników) przenoszony jest bezpośrednio (przez sprzęgło) z wału silnika na wał rozdrabniacza.

Większość spotykanych prac naukowych z zakresu doboru charakteru ruchu elementów rozdrabniających dotyczy poszukiwania takiej prędkości, która ze względu na przyjęte kryteria umożliwi najkorzystniejsze rozdrabnianie materiału o określonych właściwościach. Nie ma wśród spotykanych prac

takich, które dotyczyłyby charakteru ruchu elementu i materiału - warunkującego przecież rozdrabnianie w ogóle. W badaniach własnych, dotyczących cech ruchu, energochłonności procesu i doboru zespołów rozdrabniających [30 - 57, 145], uzyskano rezultaty, które wskazują podstawowe kierunki rozwoju i doskonalenia takich układów. Uznano, że ruch jest najważniejszą cechą maszynowych sposobów rozdrabniania.

Na rysunku 4, przedstawiającym zestawienie znanych sposobów rozdrabniania według prędkości, wskazano pewne zakresy prędkości obwodowej elementu rozdrabniającego (np. I i II), w których występują prawdopodobne rozwiązania alternatywne. Nie znaczy to, że obecnie nie ma rozdrabniaczy działających z tym zakresem prędkości. Są to jednak maszyny, które nie przeszły, w swym etapie istnienia, poza małe serie produkcyjne lub pozostają na etapie modeli badawczych.

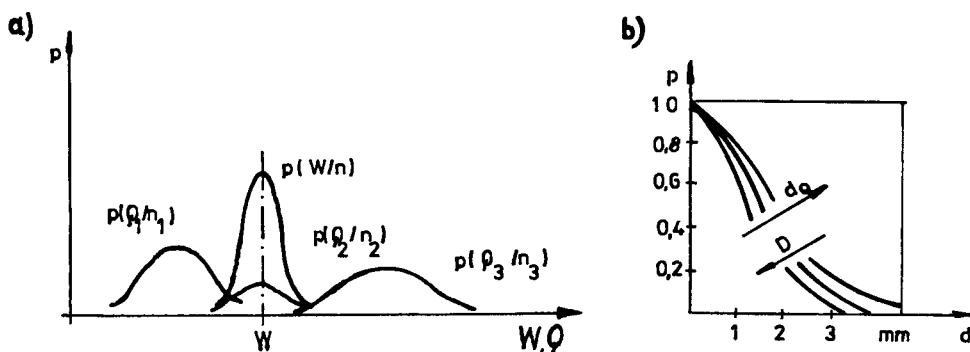


Rys. 4. Energia rozdrabniania w zależności od prędkości obwodowej i postaci konstrukcyjnej elementu rozdrabniającego [41]:

$E_{RA\max}$ - maksymalne zapotrzebowanie energii,
 $E_{RA\min}$ - minimalne zapotrzebowanie energii,
 E_{TA} - energia zużywana w warunkach modelowych,
 I - II - wolne zakresy prędkości

Na rysunku 4 linią punktową zaznaczono przebieg energii potrzebnej do rozdrobnienia próbki ziarna na zadany stopień rozdrobnienia w warunkach modelowych. Podano również przedział zmienności uwzględniający rodzaj ziarna, jego wilgotność oraz zmienność parametrów ruchu podczas prowadzenia prób. Stwierdzono [41], że energia potrzebna do rozdrabniania próbki ziarna zależy od rodzaju modelu oraz warunków prowadzenia badań.

Przy rozdrabnianiu nasion w warunkach modelowych i rzeczywistych występuje złożony stan naprężeń wynikający z równoczesnego działania zginania, rozciągania, ściskania i ścinania. Na obecnym etapie wiedzy oraz ze względu na przedmiot pracy wygodnie jest korzystać z pojęcia wytrzymałości ziarna W i prawdopodobieństwa wystąpienia obciążenia Q na pokonanie tej wytrzymałości (rys. 5).



Rys.5. Schematy do analizy prawdopodobieństwa niektórych zjawisk [96]:
 a - odkształcenia trwałe ziaren w zależności od obciążenia Q i wytrzymałości W ,
 b - wyjścia cząstki z komory rozdrabniania (d - wymiar cząstki, d_0 - średnica otworu w sicie, D - średnica komory roboczej)

Zgodnie ze zmodyfikowanym modelem wytrzymałości i obciążeń Strieleckiego [100], w pracy [41] dokonano analizy prędkości i obciążeń odkształcających trwale ziarna.

Jeżeli znany jest rozkład prawdopodobieństwa wytrzymałości nasion oraz liczba koniecznych oddziaływań odkształcających strukturę do zadanego stopnia rozdrobnienia $p(W/n)$, to dla zrealizowania przyjętego celu, przy znanym sposobie rozdrabniania, można wyróżnić [36, 41]:

- rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia obciążenia $Q_1 < W$ o liczebności zdarzeń n_1 , zależnej od prędkości,
- rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia obciążenia Q_2 porównywalnego z wytrzymałością W - o liczebności n_2 ,
- rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia obciążenia $Q_3 > W$ o liczebności n_3 .

Każde z wymienionych zdarzeń prowadzi do wystąpienia odkształceń trwałych, również obciążenie $Q_1 < W$ przy odpowiedniej liczebności oddziaływań.

Z przyjętych modeli, bez konieczności podawania szczegółowych danych liczbowych, które są różne dla każdego rozwiązania konstrukcyjnego, materiału i procesu [36, 40, 41, 45], wynikają zasadnicze kierunki doskonalenia konstrukcji. Należy:

- ograniczyć liczbę i poziom obciążeń większych od wytrzymałości do-
 rażnej nasion,
- dążyć do zachowania obciążeń Q równych wytrzymałości danego ziarna
 o znanej wilgotności,
- ograniczyć liczbę oddziaływań odkształcających trwale ziarna do teo-
 retycznie zadanej - według modelu efektywnościowego: $n = n_1 + n_2 + n_3$.

Z obecnie stosowanych jedynie w dobrze zaprojektowanym i użytkowanym rozdrabniaczu walcowym można stwierdzić spełnienie większości postawionych kryteriów [41]. Rozdrabniacz tarczowy, z tarczami kształtowanymi, jest rozwiązaniem otrzymującym według tych kryteriów niższe oceny ze względu na

dłuższą drogę (większą liczbę) oddziaływać na cząstkę, która wcześniej osiągnęła zadany stopień rozdrobnienia.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, poprawność ocen zmniejsza się ze wzrostem prędkości obwodowej, co szczególnie widać na przykładzie rozdrabniacza bijakowego (rys.4). W rozdrabniaczach tych, według wielu autorów [8, 10, 13, 36, 97, 111, 194], obciążenie Q jest do kilkuset razy większe od wytrzymałości ziarna.

Kerlin [96], zakładając wolną drogę między bijakiem i sitem rozdrabniacza, wyznaczył prawdopodobieństwo opuszczenia przestrzeni rozdrabniania w zależności od wymiarów cząstki, otworów w sicie d_0 oraz średnicy wewnętrznej komory rozdrabniania D (rys.5b).

Przyjęcie tego modelu ułatwia analizę zjawisk, a nawet modelowanie i symulację komputerową, nie uwzględnia złożonego wpływu pierścienia wirującego materiału rozdrobnionego i rozdrabnianego w warunkach rzeczywistych.

Z przedstawionych elementów podstaw konstrukcyjnych budowy rozdrabniaczy wynika, że najniższe jednostkowe zużycie energii występuje przy najniższych prędkościach, obciążeniach porównywalnych z doraźną wytrzymałością, właściwie dobranych cechach konstrukcyjnych zespołu rozdrabniającego. Spełnienie postulowanych warunków teoretycznych wymaga wielu badań konstrukcyjnych.

Wykazana w przeglądzie dotychczasowych rozwiązań niedoskonałość konstrukcyjna i funkcjonalna istniejących maszyn, stosowanych do rozdrabniania nasion, uzasadnia podjęcie badań nad udoskonaleniem tej operacji - tak w sensie zmniejszenia energochłonności, jak i poprawy składu granulometrycznego rozdrabnianego produktu - i tej sprawie poświęcona jest dalsza część pracy.

2. CEL PRACY I HIPOTEZY

2.1. Wytyczne do badań

Realizacja wszelkich poczynań zmierzających do obniżenia zużycia energii na rozdrabnianie możliwa jest jedynie poprzez wcześniejsze, wszechstronne poznanie: fizycznych właściwości ziaren, zjawisk towarzyszących zadawaniu odkształceń trwałych, rozproszenia energii w poszczególnych elementach układu rozdrabniającego i napędowego oraz potrzeby rozdrabniania.

Z aktualnego stanu badań wynika potrzeba tworzenia rozwiązań alternatywnych dla rozdrabniaczy bijakowych. Do głównych kierunków doskonalenia konstrukcji zalicza się obniżanie prędkości liniowej elementu rozdrabniającego z ponad 100 m/s do kilku metrów na sekundę, a w sprzyjających okolicznościach nawet poniżej 1 m/s; oraz dobór cech zespołu napędowego do potrzeb zespołu rozdrabniającego. Wielokierunkowe korzyści obniżania prędkości, poprawienie jakości procesu, produktu i uproszczenie warunków eksploatacji, a w doborze zespołu napędowego obniżenie energochłonności i racjonalne jej wykorzystanie, wskazują aktualność i aspekt użyteczny pracy. Wśród aspektów poznawczych należy wskazać potrzebę poznania i opisu zjawisk quasi-ścianania biologicznego materiału ziarnistego, sprawności i nierównomierności biegu strumienia napędowego oraz relacji energetycznych między produktem i procesem rozdrabniania, które do tej pory nie doczekały się, w istniejącej literaturze, pełnego rozwiązania.

Z tych powodów w dalszych badaniach zakłada się zmianę konstrukcyjnego rozwiązania maszyny rozdrabniającej z typu bijakowego na układ wielotarczowy z wałem pionowym, w której proces rozdrabniania udarowego zastąpiony jest quasi-ściananiem w warunkach małej prędkości obrotowej zespołu roboczego.

Nowy sposób rozdrabniania, prowadzony przy prędkości liniowej elementu rozdrabniającego około 1 m/s, wywołuje konieczność: zaprojektowania i zbudowania laboratoryjnego przyrządu do cięcia pojedynczych nasion, a następnie przeprowadzenia serii badań dla podstawowych zbóż, udoskonalenia przekładni poprzez wykorzystanie wyników wcześniej prowadzonych badań własnych [32], zaprojektowania i wykonania komputerowego systemu pomiarowego, który będzie jednocześnie służył do komputerowego wspomaganie konstrukcji nowych rozdrabniaczy według standardów typu CAD.

Prowadzi to do opracowania procedur matematycznych, wykorzystujących uzyskane rezultaty i umożliwiających obliczenia złożonych eksperymentów symulacyjnych.

W bloku zmiennych: materiał - maszyna - proces - cel rozdrabniania pasz należy dodatkowo uwzględnić relacje między energią wewnętrzną materiału, a energią zużytą podczas procesu.

2.2. Sformułowanie problemu

Główne zadanie stanowi uzyskanie odpowiedzi na następujące pytania:

- czym wywołany jest (lub co wywołuje) obserwowany stan energochłonności rozdrabniania nasion w warunkach rozwiązań konstrukcyjnych rozdrabniaczy wielotarczowych,
- jakie są cechy konstrukcyjne niezbędne do wystąpienia obniżonego zużycia energii przy wielotarczowym rozdrabnianiu ziarna zbóż,
- jakie są rozwiązania i modele matematyczne dla konstrukcji i napędowego układu wielotarczowego rozdrabniania ziarna zbóż oraz jakie nowe warunki są niezbędne do wystąpienia obniżonego zużycia energii.

2.3. Cel pracy

Celem pracy jest opracowanie podstaw nowego sposobu rozdrabniania - według zasady quasi-ścianania technologicznego - oraz doboru cech konstrukcyjnych rozdrabniaczy wielotarczowych z wolnoobrotowym strumieniem napędowym, a ponadto określenie zasad permanentnego doskonalenia tych i innych rozdrabniaczy w kierunku obniżania zużycia energii.

2.4. Hipotezy badawcze

W pracy prezentację hipotez ograniczono do najważniejszych, przewidywanych odpowiedzi, wynikających ze sposobu postawienia zadania:

1. Obserwowany stan zużycia energii podczas rozdrabniania nasion według zasady quasi-ścianania technologicznego wywołany jest przez ich wytrzymałość, specyficzne cechy konstrukcyjne zespołu rozdrabniającego, charakterystyki ruchowe zespołu napędowego i wzajemne relacje wymienionych czynników.

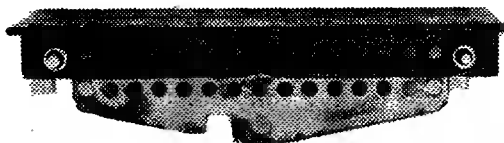
2. Stan wielkości związanych i wywołanych konstrukcją fizycznego modelu zespołu rozdrabniającego i maszyny rozdrabniającej, w warunkach modelowego i rzeczywistego rozdrabniania ziarna, można opisać zależnościami matematycznymi, pozwalającymi na opracowanie, analizę i doskonalenie konstrukcji.

3. Wykorzystując zasady rachunku całkowego i geometrii analitycznej można zaproponować model matematyczny, który po zastosowaniu procedur komputerowych stanie się narzędziem komputerowego wspomagania konstrukcji w zakresie przekroju i oporów rozdrabniania oraz konstrukcyjnych charakterystyk ruchowych przekładni mechanicznej.

3. WARUNKI BADAŃ

3.1. Przyrząd do badania cięcia pojedynczych nasion

Model wytrzymałościowy, zaprojektowany i wykonany we własnym zakresie, przedstawiony na rysunku 6, służy do analizy obciążeń i odkształceń nasion w warunkach maszyny wytrzymałościowej.



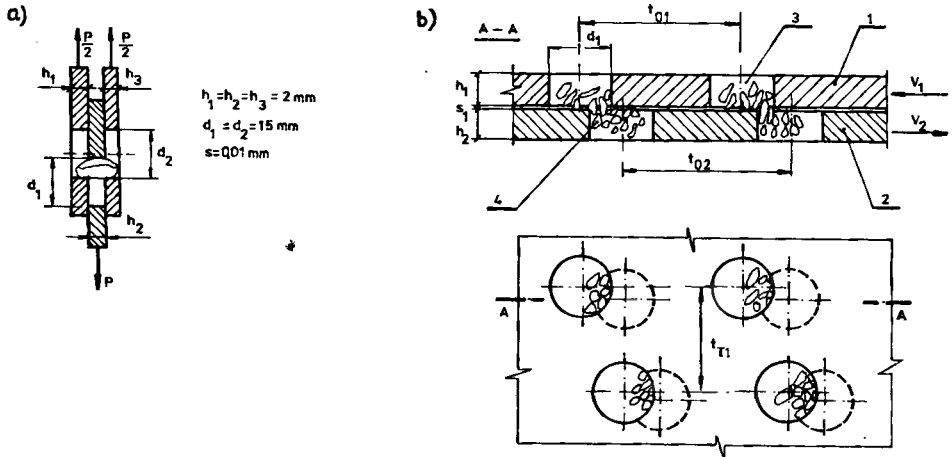
Rys.6. Przyrząd wytrzymałościowy według własnej koncepcji do badania zjawisk przy quasi-ściananiu technologicznym, dla zmiennej liczby nasion $n = 1 + 15$

Badania prowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON (Anglia) i FP 10 (NRD). Analiza wytrzymałościowa prowadzona jest z uwzględnieniem złożoności różnych oddziaływań. Wytrzymałość nasion powinna być określana na podstawie danych doświadczalnych uzyskanych z prób wytrzymałościowych na ścinanie całych lub kawałków nasion, a nie na podstawie czystego ścinania lub hipotez wycięcia. Próba quasi-ścianania jest więc próbą o charakterze czysto praktycznym.

Proste ścinanie dowolnej próbki rozumiane jako cięcie materiału może być dokonane tylko przez siły tnące, tj. siły leżące na wspólnej płaszczyźnie i posiadające przeciwne zwroty. Jak wiadomo, realizacja czystego ścinania jest technicznie niemożliwa.

W przypadku modelu płytowego z otworami - występuje przyrost momentu gnącego w funkcji grubości płyt (h_1, h_2, h_3) - rysunek 7. Nie ma więc - wykluczysz pojedyncze przekroje, w których wartość momentu gnącego jest równa zeru - ścinania ziarna bez jego równoczesnego zginania oraz - zakładając, że przekrój ziarna ulega przesunięciu - skręcania. Stąd sposób rozdrabniania podobny do ścinania technicznego nazwano quasi-ściananiem technologicznym.

Próbę ścinania przeprowadza się na uniwersalnych zrywarkach przy zastosowaniu specjalnego przyrządu pokazanego na rysunkach 6 i 7. Przyrząd składa się z trzech płaskowników o grubości h_1, h_2 i h_3 , w których wykonano po 15 współcentrycznych otworów o zmiennych średnicach d_1, d_2 lub d_3 . Podczas prób badane nasiona w liczbie od 1 do 15 sztuk umieszcza się symetrycznie do osi uchwytów maszyny.



Rys. 7. Schemat quasi-ścianania technologicznego: a - model wytrzymałościowy, b - sposób ustawienia tarcz w maszynie; 1 - tarcza górna, 2 - tarcza dolna, 3 - otwór, 4 - materiał rozdrabniany, d_1 - średnica otworu, t_0 - t_r - podziałka, h_1 - h_2 - grubość tarcz (płyt), s - szczelina, v_1 - v_2 - prędkość liniowa, P - siła

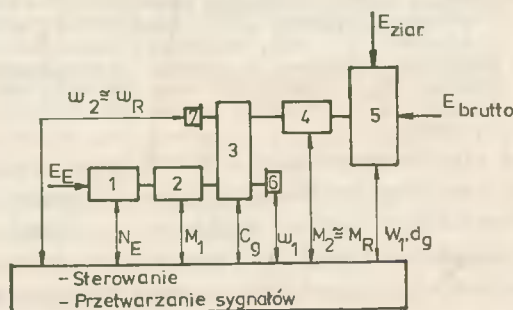
Próby prowadzi się zadając obciążenia rozciągające lub ściskające w przyrządzie - zgodnie z kierunkiem działania sił P , zaznaczonym na rysunkach 6 i 7a. W przyrządzie wytrzymałościowym istnieje możliwość regulacji szczeliny s_1 między płaskownikami, poprzez zastosowanie płytek wzorcowych o zadanym wymiarze (w pobliżu śrub mocujących - rysunek 6).

3.2. Stanowisko badawcze

Widok ogólny stanowiska badawczego, złożonego z silnika prądu stałego, tyrystorowego układu regulacji prędkości, przekładni z pasem zębatym i wielotarczowego rozdrabniacza nasion pokazano na rysunku 8. Schemat rozmieszczenia elementów składowych zamieszczono na rysunku 9. Silnik elektryczny 1 napędza poprzez momentomierz wejściowy 2, przekładnię 3, momentomierz oporów rozdrabniania 4 rozdrabniacz wielotarczowy 5. Na wale wejściowym i wyjściowym przekładni 3 umieszczono przetworniki analogowo-cyfrowe kąta ruchu 6 i 7. Strumień mocy przekazywany jest na wał rozdrabniacza 5 poprzez momentomierze indukcyjne. Sterowanie, przetwarzanie sygnałów, wizualizacja wyników i graficzna prezentacja danych realizowane są z wykorzystaniem pomiarowego systemu informacyjnego PSI AMSTRAD PC 1512 (rysunek 9).



Rys.8. Rozdrabniacz wielotarczowy na stanowisku prób;
wykonano we własnym zakresie

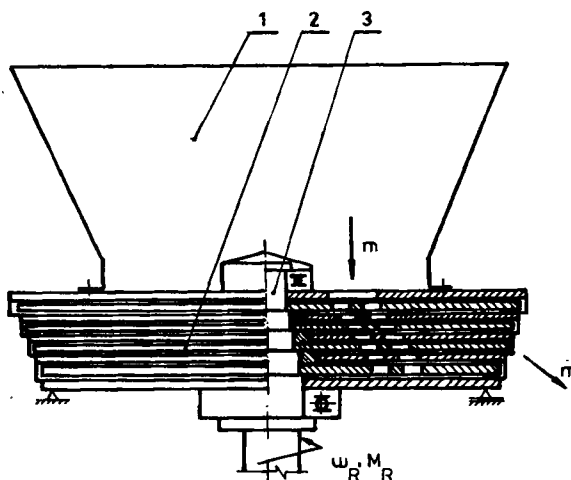


Rys.9. Schemat rozmieszczenia elementów w stanowisku badawczym:
1 - silnik, 2, 4 - przetwornik momentu obrotowego, 3 - przekładnia z pasem zębatym, 5 - rozdrabniacz, 6, 7 - przetwornik kąta ruchu, $\omega_1, \omega_2, \omega_R$ - prędkości kątowe, M_1, M_2, M_R - momenty obrotowe, W_1 - wydajność masowa, d_g - średni wymiar cząstek, E_E - energia elektryczna, sterowanie i przetwarzanie - SYSTEM PSI

Stanowisko służy do identyfikacji danych o chwilowych kątach obrotu, prędkościach, przyspieszeniach, strumieniach masy, przyrostach temperatury, momentach i siłach rozdrabniania oraz wybranych cechach konstrukcyjnych.

3.2.1. Rozdrabniacz

Istota rozdrabniacza wielotarczowego do materiałów ziarnistych polega na tym, że rozdrabniacz składa się z zespołu tarcz roboczych osadzonych współosiowo na wale (rys.10), przy czym w tarczach są otwory z krawędziami rozdrabniającymi, rozmieszczone na średnicach narastających od wejścia do wyjścia materiału z przestrzeni rozdrabniania, a prędkość między sąsiednimi tarczami jest prędkością rozdrabniania.



Rys.10. Schemat konstrukcyjny rozdrabniacza wielotarczowego według własnego patentu (P-140 486): 1 - kosz zasypowy, 2 - pakiet tarcz rozdrabniających, 3 - wał, na którym osadzone tarcze parzyste - ruchome, m - masa przepływającego ziarna, M_R - moment obrotowy na wale rozdrabniacza, ω_R - prędkość kątowna wału

Rozdrabniacze wielotarczowe należą do tej grupy urządzeń, w których proces realizowany jest przy prędkości liniowej krawędzi rozdrabniającej około 1 m/s, a materiał rozdrabniany znajduje się ciągle w przestrzeni skrawania. Ciągły kontakt materiału z elementami rozdrabniającymi i jego niska prędkość liniowa, to dwa podstawowe postulaty wysokiej skuteczności procesu [42].

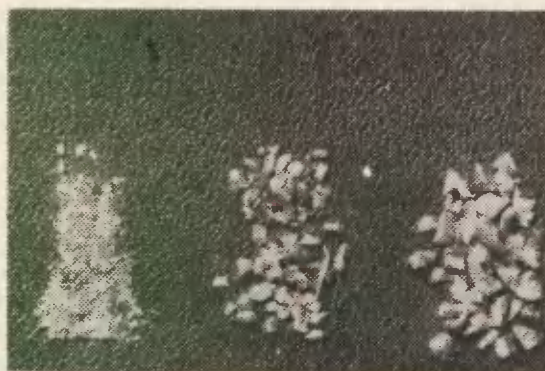
Założono, że nasiona będą rozdrabniane na zasadzie quasi-ścianania technologicznego (rys.7b oraz 8). Stan obciążeń oraz odkształcenie trwałe ziaren może wystąpić na jednej albo dwóch krawędziach utworzonych przez otwory wykonane w tarczach - znajdujących się w stanie ruchu względnego (model według rysunku 7b).

Rozdrabnianie następuje w wyniku przemieszczania tarczy 1 z prędkością v_1 względem tarczy 2 poruszającej się z prędkością v_2 (rys.7b). Rozdrabniany materiał przepływając przez otwory 3 odkształcany jest trwale przez krawędzie dwóch otworów w sąsiednich tarczach. Prędkość rozdrabniania jest równa różnicy prędkości liniowej punktów materialnych na tych tarczach.

Proces rozdrabniania maszynowego realizowano na przykładzie rozdrabniacza o postaci zespołu roboczego jak na rysunku 10. Masę ziarna wprowadzano przez otwór w górnej płycie stałej, po rozdrobnieniu uwalniano produkt przez szczelinę między tarczami oraz/lub po przejściu pionowym - przez pakiet tarcz z otworami.

Na rysunku 8 podano model techniczny maszyny wielotarczowej, służącej do rozdrabniania na zasadzie quasi-ścianania technologicznego. Produkt ta-

kiego rozdrabniania podzielony na trzy frakcje wymiarowe pokazano na rysunku 11.



$d < 0,5$ $0,5 < d < 1,5$ $d > 1,5$

Rys.11. Produkt rozdrabniania podzielony na trzy charakterystyczne frakcje wymiarowe. Rozdzielacz wielotarczowy

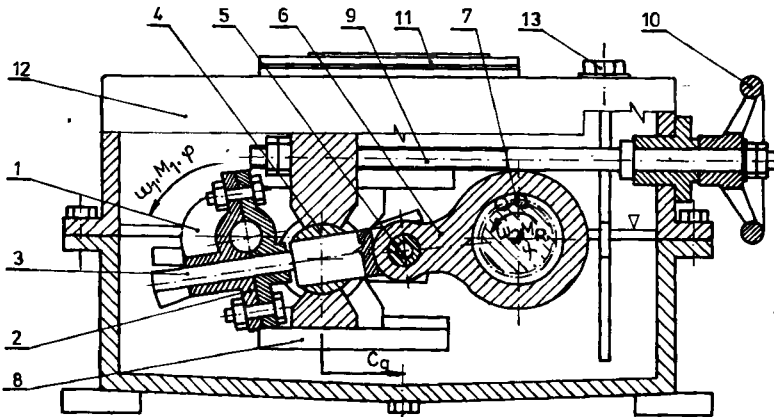
Jako cechy konstrukcyjne badane, dla rozdrabniacza wielotarczowego nasion, zostały przyjęte:

- geometryczne cechy konstrukcyjne zespołu rozdrabniającego, tj.:
 - grubość tarczy h_1 ,
 - szczelina między tarczami s_1 ,
 - średnica otworów w tarczach d_1 ,
 - kąt ostrza krawędzi otworu przepustowo-rozdrabniającego γ_1 ,
 - podziałka obwodowa rozmieszczenia otworów t_{o1} ,
 - podziałka promieniowa otworów t_{r1} ,
 - chropowatość powierzchni tarcz R_{a1} ,
 - średnica zewnętrzna tarcz D_{z1} ,
 - średnica rozmieszczenia otworów w tarczach D_{o1} ,
 - stałe cechy konstrukcyjne elementów związanych z realizacją procesu w warunkach modelowych i maszynowych C_{ks} ;
- konstrukcyjne cechy ruchu, tj.:
 - prędkość liniowa otworów w tarczach v_1 ,
 - różnica prędkości kątowej między tarczami $\Delta\omega_1$,
 - przebiegi charakterystyk ruchowych związanych z nierównomiernością kinematyczną Δ_k , dynamiczną Δ_d , ruchu $\Delta\eta$ i sprawnością η wybranych elementów strumienia napędowego,
 - sposób sterowania prędkością kątową wału rozdrabniacza wielotarczowego jako bezstopniowy - b_{sc} , stopniowy - b_{ss} i mieszany - b_{sm} ,
 - stan przełożenia kinematycznego i_{k1} i dynamicznego i_{d1} ;
- sposób przepływu masy przez rozdrabniacz:
 - przejście przez szczeliny między tarczami S_1 ,
 - przejście przez pakiet tarcz z otworami S_2 ,
 - przez szczelinę i wzdłuż pakietu tarcz $S_{1/2}$.

Zasadnicze trudności w sterowaniu cech ruchu rozdrabniacza wielotar-
czowego występują w doborze wolnoobrotowej przekładni mechanicznej
(15 min^{-1} do 175 min^{-1}). Ze względu na niewielką prędkość obrotową zespołu
roboczego oraz na względnie niską sprawność przekładni stosowanych dotąd,
zdecydowano podjąć próby nad zastosowaniem przekładni własnej konstrukcji
[32], o działaniu impulsowym.

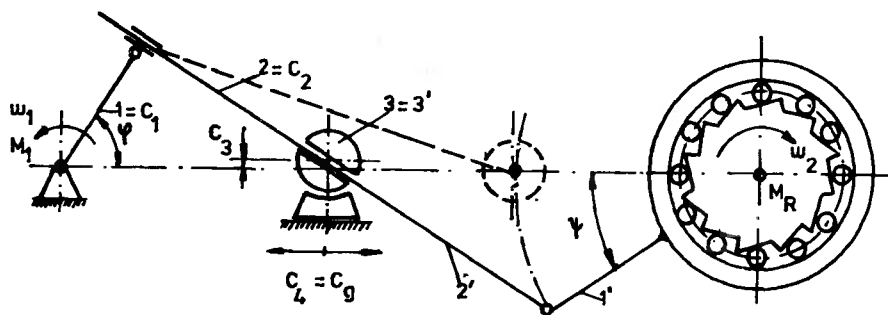
3.2.2. Przekładnia

W badanej przekładni impulsowej typu 8001/06 (rys.12) [32], napęd
przenoszony jest z wykorbionego wału wejściowego 1 poprzez jarzmo 2 two-
rzące węzeł cierny z dźwignią 3, podpartą w przegubie ślizgowym 4, a z
niej na ramię obejmy 6 poprzez sworzeń 5. Ramię obejmy 6 stanowi integralną
część sprzęgła jednokierunkowego 7, osadzonego na wale wyjściowym. War-
tość przełożenia kinematycznego i prędkości wału rozdrabniacza nastawia
się śrubą 9, którą przesuwają przegub 4 z obudową w prowadnicach 8, zmie-
niając w ten sposób wartość cechy geometrycznej C_g . W zależności od usta-
wienia środka obrotu przegubu 5, otrzymuje się zmienną wartość amplitudy
wahań ramienia 6, a dzięki temu zmienną - w sposób ciągły typu b_{gc} - w
funkcji C_g prędkość kątową wału wyjściowego przekładni, równą prędkości
kątowej wału rozdrabniacza. Pokrętło 10 służy do obracania śrubą 9, nato-
miast orientacyjne wartości prędkości kątowej można odczytać na tablicz-
ce 11, umieszczonej w górnej części korpusu 12. Zasadnicze pary - współ-
pracujące ciernie - umieszczone są w oleju, którego poziom sprawdza się za
pomocą wskaźnika 13.



Rys.12. Schemat konstrukcyjny zmodernizowanej BPI typu 8001/06:
1 - wał wejściowy, 2 - panewki, 3 - łącznik, 4 - przegub,
5 - sworzeń, 6 - ramię, 7 - sprzęgło jednokierun-
kowe, 8 - prowadnica, 9 - śruba regulacji, 10 - pokrętło,
11 - wskaźnik prędkości, 12 - korpus, 13 - wskaźnik
oleju

Elementy mechanizmu impulsowego badanej BPI pokazano na rysunku 13.



Rys.13. Schemat mechanizmu impulsowego zastosowanego w badaniach rozdrabniacza: 1 - ramię wykorbienia, 2 - wałek wodzący, 3 - przegub ślizgowy, $C_1 - C_4$ - geometryczne cechy konstrukcyjne (zmiennie badane)

Przekładnia składa się z trzech takich mechanizmów impulsowych, przesuniętych w fazie działania o $\frac{2}{3}\pi$.

Napęd z silnika na rozdrabniacz przenoszony jest z wykorbionego wału 1 (rys.13) poprzez jarzmo na wałek wodzący $2 = 2'$ podparty w przegubie ślizgowym $3 = 3'$, a z niego na ramię obejmy $1'$. Wał wyjściowy BPI podczas badań połączony jest z wałem rozdrabniacza za pomocą momentomierza indukcyjnego (rys.9).

Sterowanie cechami konstrukcyjnymi badanej przekładni w warunkach rozdrabniania ograniczono głównie do cech ruchu o znaczeniu użytkowym, tj.:

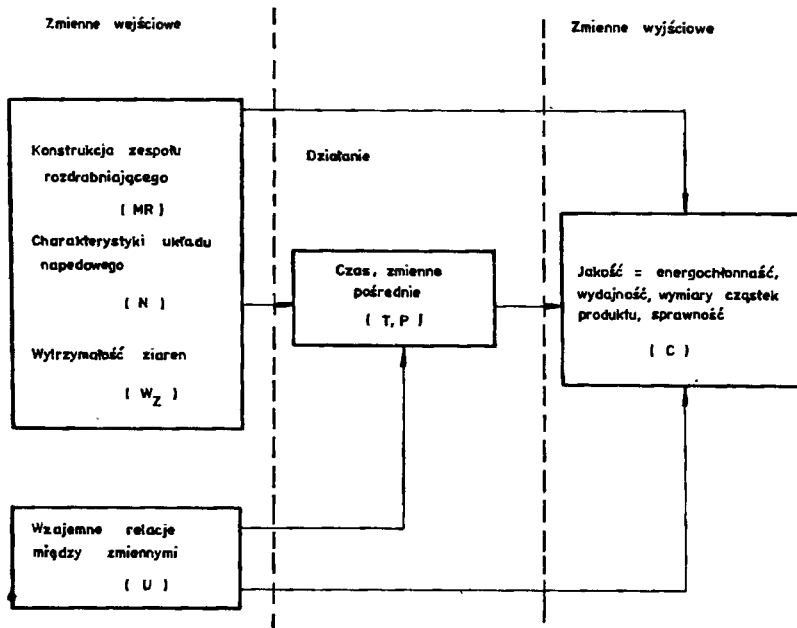
- prędkości załączania sprzęgła jednokierunkowego wału wyjściowego ω_1 ,
- kąta ruchu wykonawczego elementu mechanizmu impulsowego φ ,
- ramienia przyłożenia oporów rozdrabniania C_m .

Bezstopniowa regulacja prędkości rozdrabniania, z jednoczesną zmiennością momentu hamującego - występująca w wyniku rozdrabniania - pozwala na prowadzenie badań charakterystyk ruchowych układu rozdrabniającego. Dotyczy to przełożeń, nierównomierności biegu, poślizgów i sprawności strumienia napędowego. Można więc wyznaczyć zakres cech ruchu, w którym rozdrabnianie jest w ogóle możliwe i dobrać cechy ruchu, które odpowiadają najwyższej skuteczności procesu.

3.3. Rozważania nad modelem i oceną procesu rozdrabniania oraz zakres badań w przyjętych warunkach

Przykład zmiennych w przestrzeni badań rozdrabniania wielotarczowego podano na rysunku 14.

Zakładając, że ziarno jest złożonym elementem konstrukcyjnym zespołu rozdrabniającego MR, przedstawiony model można opisać wejściami (MR, N, W_z, U) oraz wyjściami o postaci celu (C).



Rys.14. Identyfikacja zmiennych w przestrzeni działania

W zakresie zmiennych wejściowych wyróżnia się następujące założenia:

- konstrukcja zespołu rozdrabniającego MR dotyczy rozwiązania istniejącego oraz poszukiwanego ze względu na przyjęty poziom realizacji celu C,
- konstrukcja jest to opisywany matematycznie układ stanów i struktur zespołu rozdrabniającego oraz jego modeli fizycznych,
- charakterystyki układu napędowego N dotyczą transmisji i transformacji przeniesienia mocy oraz poziomów równomierności - ze względu na skuteczność rozdrabniania C,
- wytrzymałość ziarna W_z dotyczy rodzaju i przebiegu odkształcenia trwałego w rozdrabnianych ziarnach, jako skutków działania określonego obciążenia,
- o poziomie realizacji celu C decydują wzajemne relacje między cechami konstrukcyjnymi zespołu rozdrabniającego, wytrzymałością i sposobem zadawania obciążeń, a charakterystykami ruchu elementów układu napędowego,
- badania realizowane są przy założeniu wpływu czasu i zmiennych pośrednich T, P na stan techniczny i wzajemne relacje wewnętrzne.

W podstawach konstrukcji i identyfikacji wielu zjawisk zachodzących podczas rozdrabniania korzysta się najczęściej z bilansu energetycznego uzupełnionego o specyficzne opisy analityczne [44, 68, 69]. Można zatem napisać, że zbiór czynników istotnych ma postać:

$$I = (C_g, C_m, C_d, C_r, \eta'_N, Z_1, \zeta, U) \quad (1)$$

gdzie:

- C_g - cechy geometryczne elementów rozdrabniania,
- C_m - cechy materiałowe elementów rozdrabniania,
- C_d - cechy dynamiczne elementów we wzajemnych relacjach,
- C_r - cechy ruchu elementów rozdrabniających i rozdrabnianych,
- η'_N - niesprawność w strumieniu napędowym,
- Z_1 - rodzaj rozdrabnianego ziarna,
- ζ - wypadkowy wektor oporów przepływu,
- U - obciążenie wynikające ze wzmacniania się oddziaływań transportowych, kształtowych i z przesterowania.

Wobec powyższego semantyczny model skuteczności rozdrabniania sprowadzony do poziomu energochłonności ma postać:

$$E = f(C_k, C_r, W_z, \eta'_N, \Delta E_p) \quad (2)$$

gdzie:

- C_k - specyficzne cechy konstrukcyjne wpływające na zużycie energii,
- C_r - cechy ruchu elementów rozdrabniających, warunkujące rozdrabnianie i poziom zużycia energii,
- W_z - wytrzymałość materiału rozdrabnianego, wywołująca opór określany za pomocą prób wytrzymałościowych w warunkach modelowych,
- η'_N - ogólna niesprawność strumienia napędowego,
- ΔE_p - różnica energii pomiędzy warunkami rzeczywistymi i modelowymi.

Po wprowadzeniu niezbędnych uproszczeń powstaje model energetyczny procesu rozdrabniania wyrażony następującą funkcją:

$$E_c = \Delta E_{ST} + \Delta E_N + \Delta E_R + \Delta E_O + \Delta E_X \quad (3)$$

gdzie:

- E_c - energia całkowita dostarczona do układu (rys.2),
- ΔE_{ST} - energia przeznaczona na sterowanie procesem,
- ΔE_N - energia tracona w układzie napędowym,
- ΔE_R - energia tracona w rozdrabniaczu,
- ΔE_O - energia przeznaczona na obsługę procesu,
- ΔE_X - energia rozpraszana w układzie (drżania, ciepło, fale akustyczne itp.).

Dla podstaw konstrukcyjnych budowy rozdrabniaczy wielotarczowych najważniejsze są zjawiska zachodzące w zespole rozdrabniającym i napędowym. Ujęcie konstrukcyjne zagadnień energetycznych upraszcza zależność (3) do postaci (rys.3):

$$E_c = \Delta E_N + \Delta E_R \quad (4)$$

co zgodnie z rysunkami 2 i 3 oraz zależnością (2) przy założeniu, że $E_c = E_e$ - energia elektryczna, pozwala wyznaczyć energię niezbędną do maszynowego rozdrabniania nasion jako:

$$E_{R\lambda} = \int_0^T P_R(t) v(t) dt ; \quad \text{dla } P_R > 0, \quad v > 0 \quad (5)$$

gdzie:

- P_R - siła rozdrabniająca, N,
 v - prędkość rozdrabniania, m/s,
 $E_{R\lambda}$ - energia potrzebna do mechanicznego odkształcenia próbki nasion w czasie trwania cyklu do zadanego stopnia rozdrobnienia, J,
 T - czas trwania cyklu, s.

Jednocześnie zachodzi związek:

$$E_{R\lambda} = E_E \cdot \eta_S \cdot \eta_P \quad (6)$$

gdzie:

- η_S - sprawność mechaniczna silnika, -,
 η_P - sprawność mechaniczna przekładni, -,
 E_E - energia dostarczana na wejście układu, J.

W ruchu ustalonym, dla pełnego cyklu ruchu lub jego wielokrotności, można przyjąć że:

$$E_{R\lambda} = E_{T\lambda} + \Delta E_M \quad (7)$$

gdzie:

- $E_{T\lambda}$ - energia potrzebna do mechanicznego odkształcenia próbki nasion, w warunkach modelowych, do zadanego stopnia rozdrobnienia, J,
 ΔE_M - przyrost strat energii na realizację rozdrabniania w warunkach maszynowych, J.

Przyrost energii na realizację rozdrabniania w warunkach maszynowych może być wyrażony w postaci współczynnikowej:

$$E_{T\lambda} = \alpha_R \cdot E_{R\lambda} ; \quad \alpha_R = \frac{E_{T\lambda}}{E_{R\lambda}} \quad (8)$$

gdzie:

- α_R - wskaźnik energetycznych relacji jako miara realizacji modelu w warunkach maszynowych, - ,

Porównując zależności (6) i (7) można wyznaczyć przyrost energii na realizację rozdrabniania w warunkach maszynowych:

$$\Delta E_M = E_E \cdot \eta_S \cdot \eta_P - E_{T\lambda} \quad (9)$$

Model opisany zależnością (9) dotyczy realizacji procesu przez zespół rozdrabniający. Uwzględnia rozproszenia energii, które nie dotyczą bezpośrednio odkształcenia rozdrabnianego materiału.

Z zasady zachowania energii wynika, że energia kinetyczna elementu rozdrabniającego przed rozdrabnianiem zamieniana jest w momencie kontaktu z cząstką na [20, 111]:

$$E_{T\lambda} = E_T + E_m + E_p \quad (10)$$

gdzie:

E_T - energia kinetyczna elementu roboczego po odkształceniu ziarna, J,

E_m - energia kinetyczna cząstek materiału po rozdrobnieniu, J,

E_p - energia zużyta na wykonanie pracy odkształcenia, J.

Z zależności (7) i (10) wynika złożoność pojęcia pracy użytecznej. Z pierwszej wynika wieloraki charakter użyteczności, z drugiej złożoność zjawiska - nawet w warunkach modelowych można wyznaczyć doświadczalnie jedynie E_p . Wymienione zależności, przede wszystkim (10), pozwalają na jednoznaczne zakwalifikowanie wszystkiego, co nie wiąże się z odkształceniem, do grupy oporów maszynowych. W odniesieniu do złożonego układu technicznego, pojęcie oporów maszynowych uwzględnia energochłonność: ruchu jałowego, realizację przepływu podczas rozdrabniania i przełożeń w przekładni mechanicznej. Zależność (4) pozwala na opisanie energii niezbędnej do realizacji ruchu funkcjonalnego - po uproszczeniu do postaci:

$$E_c = \Delta E_{Nj} \quad (11)$$

Układ napędowy jest w tym przypadku rozumiany szerzej, niż w podstawowej zależności (4) - dotyczy bowiem całego strumienia napędowego, tj. silnika, przekładni i innych elementów napędowych oraz rozdrabniających. Może więc być rozpatrywany według bilansu oporów ruchu.

Korzystając z wzoru na ogólne opory rozdrabniania w postaci [40]:

$$P_R = k_j \cdot v_r + \sigma_{\max} \cdot F_r + \varepsilon \cdot F_r' \cdot v_r^2 \quad (12)$$

gdzie:

k_j - współczynnik oporów ruchu jałowego, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$,

v_r - prędkość rozdrabniania, m/s,

σ_{\max} - maksymalne naprężenia w miejscu oddziaływania elementu rozdrabniającego na materiał, N/m^2 ,

F_r, F_r' - pole rozdrabnianego przekroju, m^2 ,

ε - współczynnik proporcjonalności, $\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$,

można po wykorzystaniu zależności (5) i porównaniu z zależnością (6) otrzymać uproszczony wzór na energochłonność rozdrabniania, uwzględniający jednak większość czynników wymienionych w zależności (2) jako istotne:

$$E_E = \frac{(k_j \cdot v_r + \sigma_{\max} \cdot F_r + \varepsilon \cdot F_r' \cdot v_r^2) \cdot v_r \cdot t}{v_S \cdot \eta_P} \quad (13)$$

gdzie:

t - czas rozdrabniania zadanego przekroju względnego, s.

Wzór (13) obejmuje zasadnicze elementy modelu sprawnościowo-energetycznego dla rozdrabniaczy wielotarczowych. Ma również znaczenie ogólne. Maksymalne naprężenia, między innymi, są związane ze specyficznymi cechami

konstrukcyjnymi spotykanych rozdrabniaczy walcowych, tarczowych, nożowych, kulowych i bijakowych. Ponadto wymienione współczynniki proporcjonalności zależą również od geometrycznych, materiałowych i dynamicznych cech konstrukcyjnych.

Zależność (13), podobnie jak inne modele spotykane dotąd, nie uwzględnia specyfiki rozdrabniania dla celów paszowych, związanych z podwyższeniem skuteczności żywienia [151].

Wykorzystując definicję biologicznego wskaźnika rozdrabniania [46, 53] i liczbowego wskaźnika efektywności rozdrabniania ziaren zbóż [54], ogólny model energetyczny sprowadza się do postaci:

$$e_R = \frac{(\eta_{\text{bio}} - \eta_z) \cdot E_{\text{brutto}} \cdot \eta_S \cdot \eta_P}{(k_j \cdot v_R + \sigma_{\text{max}} \cdot F_R + \epsilon \cdot F_R' \cdot v_R^2) \cdot v_R \cdot t \cdot M_k} \quad (14)$$

gdzie:

- η_{bio} - wskaźnik wartości biologicznej, wyznaczany na podstawie analizy sitowej i strawności in vitro, dla produktu rozdrabniania, -,
- η_z - wskaźnik strawności ziarna przed rozdrobnieniem, -,
- E_{brutto} - średnia zawartość energii brutto w 1 kg suchej masy ziarna, np. żyto 15,7 MJ/kg, pszenica 16,2 MJ/kg, pszenżyto 16,1 MJ/kg, jęczmień 15,9 MJ/kg, owies 16,5 MJ/kg [151], MJ/kg,
- M_k - wskaźnik krotności próby masowej - jeśli składniki mianownika dotyczą danych różnych od 1 kg.

Dla zadanego przedziału wartości biologicznej poszczególnych grup wymiarowych produktu rozdrabniania istnieje możliwość obliczenia wskaźnika energetycznego [41, 45, 46, 53]:

$$\eta_{\text{bio}} = f_{<0,5} \cdot \eta_{\text{bio}<0,5} + f_{0,5-1,5} \cdot \eta_{\text{bio}0,5-1,5} + f_{>1,5} \cdot \eta_{\text{bio}>1,5} \quad (15)$$

gdzie:

- η_{bio} - wskaźnik wartości biologicznej produktu rozdrabniania,
- $\eta_{\text{bio}<0,5}, \eta_{\text{bio}0,5-1,5}, \eta_{\text{bio}>1,5}$ - wskaźnik wartości biologicznej frakcji produktu o podanych wymiarach,

$f_{<0,5}, f_{0,5-1,5}, f_{>1,5}$ - udziały frakcji o podanych wymiarach.

Tak obliczony wskaźnik wartości biologicznej produktu rozdrabniania jest przedziałem liczbowym wyznaczonym z odpowiednim prawdopodobieństwem, lub wartością średnią dla badanego kryterium celu. Znajomość tego wskaźnika umożliwia obliczenie stosunku przyrostu energii wyzwolonej dzięki rozdrabnianiu do nakładów poniesionych na jej uzyskanie. Z uwagi na analizę złożonego układu technicznego, niezbędne jest przeprowadzenie w tym celu pomiarów chwilowych sprawności mechanicznej silnika i przekładni.

Bezpośrednie połączenie układu napędowego i rozdrabniającego (rys.3) pozwala na definicję sprawności ogólnej w postaci:

$$\eta_0 = \eta_S \cdot \eta_P \cdot \eta_R \quad (16)$$

gdzie:

- η_0 - sprawność ogólna technicznego układu do rozdrabniania,
- η_R - sprawność względna rozdrabniania, jako miara realizacji modelu w warunkach rzeczywistych (α_R).

Dla przeprowadzenia procedury związanej z modelowaniem wielotarczowego sposobu rozdrabniania wymagany jest eksperyment umożliwiający wyznaczenie:

- pracy potrzebnej do mechanicznego odkształcenia próbki ziaren do zadanych wymiarów,
- naprężeń przy odkształceniu wielokrawędziowym różnych ziaren zbiór w zmiennych warunkach ruchu.

Natomiast weryfikacja modelu w warunkach maszynowych wymaga badań:

- charakterystyk rozdrabniania wielotarczowego w zależności od rodzaju ziarna i konstrukcyjnych cech ruchu,
- energetycznych wskaźników rozdrabniania w zależności od parametrów procesu,
- sprawności mechanicznej układu napędowego w zależności od konstrukcji rozdrabniacza wielotarczowego i rozdrabnianego materiału.

Wyniki tak prowadzonego eksperymentu uzupełniają dane o procesie i materiale, które zostaną wykorzystane we wspomaganie konstruowania wielotarczowych rozdrabniaczy nasion.

3.4. Materiały stosowane w badaniach

Wilgotność ziarna zawierała się w dopuszczalnych do rozdrabniania przedziałach 12% - 14% [79]. Do prób wybierano ziarno losowo z odmian:

- pszenżyto ozime LARGO, ze zbiorów 1986 roku,
- żyto ozime DAŃKOWSKIE ŻŁOTE, ze zbiorów 1986 roku,
- pszenica ozima DANA, ze zbiorów 1986 roku,
- jęczmień jary GRYP, ze zbiorów 1986 roku,
- owies jary BORUTA, ze zbiorów 1986 roku.

Wybrane właściwości badanego materiału podano w wynikach badań.

3.5. Miejsce realizacji badań

Zasadniczą część pracy zrealizowano w Katedrze Maszyn Rolniczych i Pojazdów Wydziału Mechanicznego ATR w Bydgoszczy. Badania wskaźników energetycznej efektywności rozdrabniania ziaren zbiór prowadzono przy pomocy

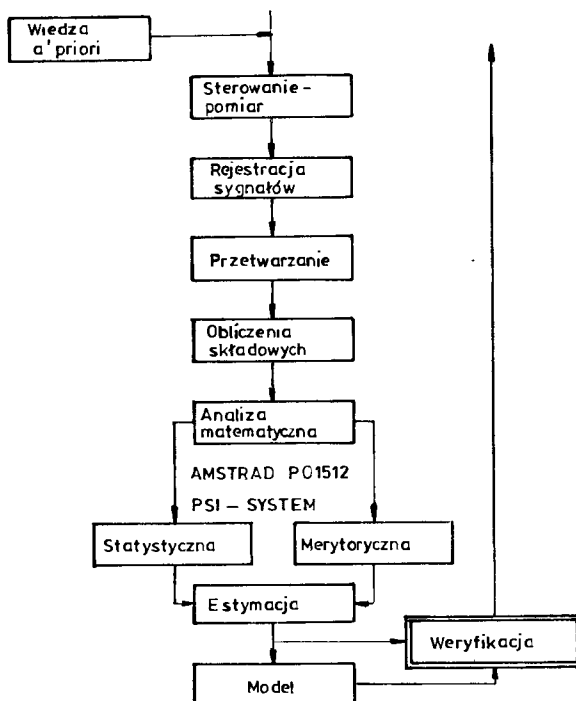
pracowników Katedry Żywienia Zwierząt i Gospodarki Paszowej Wydziału Zootechnicznego ATR. Natomiast opracowanie procedur pomiarów, tabelarycznej i graficznej prezentacji danych oraz analizy statystycznej i merytorycznej w Pomiarowym Systemie Informacyjnym PSI - AMSTRAD PC-1512 - korzystając z pomocy pracowników Zakładu Techniki Cyfrowej i Elektronicznej Techniki Obliczeniowej ATR w Bydgoszczy.

4. METODYKA BADAŃ

4.1. Schemat eksperymentu

Podstawowe elementy metodyki badań wielotarczowych rozdrabniaczy nasion podano na rysunku 15. Obejmują one:

- sterowanie pomiarem i pomiar sygnałów służących do wyznaczenia zasadniczych wskaźników materiału, procesu i konstrukcji,
- rejestrację sygnałów według przyjętych technik obliczeń, estymacji i weryfikacji modelu konstrukcji,
- przetwarzanie danych według przyjętych wskaźników dla zmiennych,
- obliczenia składowych dla dalszych analiz statystycznych i merytorycznych.



Rys.15. Podstawowe elementy identyfikacji konstrukcji układu rozdrabniającego i napędowego

Ocenę poziomu wrażliwości wskaźników przeprowadza się podczas wyznaczania ogólnej dokładności pomiarów.

Weryfikacja polega na określeniu rozbieżności pomiędzy modelem konstrukcyjnym a układem rzeczywistym. Podstawowym kryterium wiarygodności otrzymanego modelu rozdrabniacza jest badanie (wg rys.1) jego realizowalności fizycznej.

W badaniach wstępnych nie prowadzi się modelowania, ani weryfikacji, pozostałe elementy schematu obowiązują jak w badaniach zasadniczych.

4.2. Metodyka badań wstępnych i zasadniczych

Metodyka obejmuje całkowicie lub częściowo następujące zagadnienia:

- modelowanie konstrukcji zespołu rozdrabniającego i napędowego,
- badanie charakterystyk ziarna,
- planowanie i realizację doświadczeń,
- analizę merytoryczną i statystyczną wyników.

Zależność (16) ma znaczenie potencjalne, wyznaczenie sprawności ogólnej technicznego układu do rozdrabniania wymaga znajomości chwilowych przebiegów (rys.9):

- prędkości kątowej wału wejściowego przekładni $\omega_{1pi} = \omega_{Si}$,
- prędkości kątowej wału wyjściowego przekładni $\omega_{2pi} = \omega_{ri}$,
- momentu obrotowego na wale wejściowym przekładni $M_{1pi} = M_{Si}$,
- momentu obrotowego na wale wyjściowym przekładni $M_{2pi} = M_{ri}$,
- mocy pobieranej przez silnik elektryczny N_{E1} ,
- pracy potrzebnej do rozdrabniania próbki ziaren o określonej masie do zadanego stopnia rozdrobnienia $E_{T\lambda}$.

Przebiegi chwilowe wymienionych charakterystyk pozwalają określić:

- przełożenie kinematyczne przekładni

$$i_{ki} = \frac{\omega_{2pi}}{\omega_{1pi}} \quad (17)$$

- przełożenie dynamiczne

$$i_{di} = \frac{M_{2pi}}{M_{1pi}} \quad (18)$$

- moc na wejściu przekładni równą mocy na wyjściu silnika

$$N_{1pi} = N_{Si} = \omega_{1pi} \cdot M_{1pi} \quad (19)$$

- moc na wyjściu przekładni równą mocy na rozdrabnianie

$$N_{2pi} = N_{ri} = \omega_{2pi} \cdot M_{2pi} \quad (20)$$

a w konsekwencji sprawność przekładni jako

$$\eta_{pi} = \frac{N_{2pi}}{N_{1pi}} = \frac{\omega_{2pi}}{\omega_{1pi}} \cdot \frac{M_{2pi}}{M_{1pi}} = i_{ki} \cdot i_{di} \quad (21)$$

- sprawność silnika

$$\eta_S = \frac{M_{Si} \cdot \omega_{Si}}{N_{Ei}} \quad (22)$$

- sprawność względną rozdrabniania

$$\eta_R = \frac{E_{T\lambda}}{M_{r1} \cdot \omega_{r1} \cdot \tau} \quad (23)$$

gdzie:

τ - średni czas potrzebny do rozdrobnienia próbki ziarna w warunkach rzeczywistych.

Obniżenie niesprawności wolnobieżnego układu napędowego, a nawet podwyższenie skuteczności rozdrabniania jest możliwe dla impulsowego ruchu zespołu rozdrabniającego, przy zachowaniu odpowiednich wartości wskaźników związanych z pozostałymi charakterystykami ruchu, a mianowicie:

- stopniem nierównomierności kinematycznej

$$\Delta_k = \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum (i_{ki} - i_{km})^2}}{i_{km}} \quad (24)$$

- stopniem nierównomierności dynamicznej

$$\Delta_d = \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum (i_{di} - i_{dm})^2}}{i_{dm}} \quad (25)$$

- stopniem nierównomierności ruchu

$$\Delta_{\eta} = \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\eta_i - \eta_m)^2}}{\eta_m} \quad (26)$$

gdzie we wzorach (24) + (26) oznaczono:

i_{km} - średnią wartość przełożenia kinematycznego,

i_{dm} - średnią wartość przełożenia dynamicznego,

η_i - chwilową wartość sprawności mechanicznej,

η_m - średnią wartość sprawności mechanicznej,

n - liczbę obserwacji, np. $\frac{1000}{2\pi}$ obrotów wału rozdrabniacza.

Zużycie energii towarzyszące rozdrabnianiu rzeczywistego strumienia masy wyznacza się jako:

$$E_{R\lambda} = \frac{N_R}{W_1} \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (27)$$

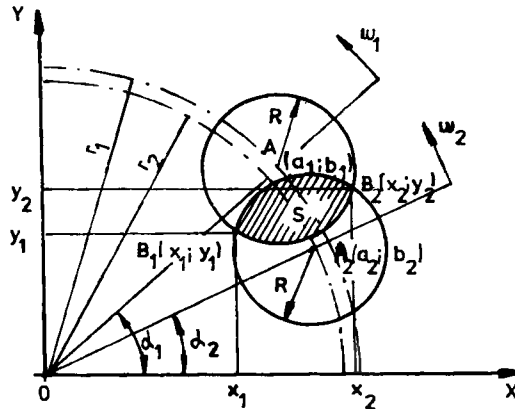
lub w odniesieniu do złożonego układu technicznego

$$E_R = \frac{N_S}{W_1} \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (28)$$

gdzie:

W_1 - wydajność masowa rozdrabniania, kg/s.

Specyfika konstrukcyjna rozdrabniaczy wielotarczowych wymaga ponadto specjalnych procedur na obliczanie przekroju rozdrabniania i przepływu materiału. Przekrój rozdrabniania F_r i F_r' - wg zależności (14), wyznacza się z podstawowej zależności na efektywną powierzchnię między krawędziami otworów rozdrabniających (rys.16).



Rys.16. Pole między krawędziami otworów rozdrabniających

Łuki okręgów uczestniczących w rozdrabnianiu opisują zależności (rysunek 16):

$$\begin{cases} y = b_1 - \sqrt{R^2 - (x - a_1)^2} & \text{- dolny łuk} \\ y = b_2 - \sqrt{R^2 - (x - a_2)^2} & \text{- górny łuk} \end{cases} \quad (29)$$

gdzie:

a_1, a_2, b_1, b_2 - współrzędne środków otworów rozdrabniających,
 R - promień otworu rozdrabniającego.

Pole między krawędziami otworów rozdrabniających:

$$\begin{aligned} S &= \int_{x_1}^{x_2} (b_2 + \sqrt{R^2 - (x - a_2)^2}) dx - \int_{x_1}^{x_2} (b_1 - \sqrt{R^2 - (x - a_1)^2}) dx = \\ &= b_2 \int_{x_1}^{x_2} dx + \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{R^2 - (x - a_2)^2} dx - b_1 \int_{x_1}^{x_2} dx + \\ &+ \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{R^2 - (x - a_1)^2} dx \end{aligned} \quad (30)$$

Pole S jest maksymalne, gdy środki okręgów $A_1(a_1; b_1)$ i $A_2(a_2; b_2)$ leżą na jednej prostej i $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 = \omega_1 \cdot t - \omega_2 \cdot t = t \cdot (\omega_1 - \omega_2) \Rightarrow 0$; dla

$\alpha_1 = \omega_1 \cdot t$ i $\alpha_2 = \omega_2 \cdot t$ jest to przypadek, w którym następuje głównie transport materiału bez rozdrabniania krawędziowego.

Pole S jest równe zero, gdy zachodzi zależność:

$$\sqrt{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} = 2R$$

i

$$\Delta \alpha = t \cdot (\omega_1 - \omega_2) \Rightarrow \max;$$

jest to koniec rozdrabniania, wynikający z zamknięcia pola oddziaływania międzykrawędziowego. Przez ω_1 i ω_2 oznaczono prędkości kątowe sąsiednich tarcz z otworami.

Rozdrabnianie jest realizowane, gdy jest spełniony warunek:

$$\begin{cases} \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} < R \\ \Delta \alpha < \Delta \alpha_{\max} \end{cases} \quad (31)$$

Wiedząc, że:

$$F_r = \psi \cdot S$$

oraz

$$F_r' = k \cdot F_r$$

ogólny model energetyczny wielotarczowego rozdrabniania ziaren zbóż na paszę ma postać:

$$e_R = \frac{(\eta_{\text{bio}} - \eta_z) \cdot E_{\text{brutto}} \cdot \eta_S \cdot \eta_P}{[k_j \cdot v_r + \psi \cdot S \cdot (\sigma_{\max} + k \cdot \epsilon \cdot v_r^2)] \cdot v_r \cdot t \cdot M_k} \quad (32)$$

gdzie:

ψ - współczynnik wypełnienia pola przekroju rozdrabnianym materiałem - ustalany doświadczalnie,

k - współczynnik wtórnych oddziaływań między powierzchnią tarcz - ustalany doświadczalnie.

Przyjmując określony zbiór wielkości charakteryzujących obiekt badany wprowadzono pojęcie jakościowego modelu w postaci ogólnej:

$$F_{R-N}(C_1, C_2, \dots, C_n) = 0 \quad (33)$$

gdzie:

F_{R-N} - funkcja obiektu badań,

C_{1-n} - czynniki badane - cechy konstrukcyjne wybranych elementów technicznego układu rozdrabniania.

W zakresie planowania i realizacji doświadczeń przyjmuje się następujące definicje:

- zbiór wielkości wejściowych jako (rys.14)

$$X, (x_1, x_2, \dots, x_i), (x_k: k = 1, 2, \dots, i), (x_k) \quad (34)$$

$$Y, (y_1, y_2, \dots, y_i), (y_k: k = 1, 2, \dots, i), (y_k) \quad (35)$$

$$U, (u_1, u_2, \dots, u_i), (u_k: k = 1, 2, \dots, i), (u_k) \quad (36)$$

gdzie:

X - zbiór cech konstrukcyjnych zespołu rozdrabniającego MR i jego modelu wytrzymałościowego W_z ,

Y - zbiór cech konstrukcyjnych zespołu napędowego N,

U - zbiór relacji w złożonym układzie technicznym,

- zbiór wielkości wyjściowych (związanych z funkcją celu)

$$Z, (z_1, z_2, \dots, z_w), (z_p: p = 1, 2, \dots, w), (z_p) \quad (37)$$

gdzie:

w - liczba możliwych odpowiedzi - stanów wskaźników jakości rozdrabniania - na kombinatoryczny układ czynników badanych,

- zbiór wielkości stałych

$$CS, (c_1, c_2, \dots, c_g), \quad (38)$$

który opisuje wybrane właściwości materiału rozdrabnianego, procesu, pomiaru i otoczenia.

Badania doświadczalne prowadzone są według planów doświadczeń typu PS/D, PS/R oraz PD - z sekwencją losową [32, 139].

Analiza wyników uwzględnia dwa aspekty:

- statystyczny - umożliwiający otrzymanie funkcji obiektu badań, czyli pewnej zależności aproksymującej wyniki badań,
- merytoryczny - mający na celu przekształcenie funkcji obiektu badań w jego model matematyczny.

Dla przyjętych wskaźników i założeń metodycznych rozwiązanie postawionego zadania konstrukcyjnego polega na uzyskaniu wskaźnika energetycznej efektywności rozdrabniania ziarna zbóż zmierzającego do maksimum:

$$(x^M \in \varphi) : \left\{ \bigwedge_{x \in \varphi} e_R(x) = e_R(x^M) \right\} \quad (39)$$

gdzie:

x^M - rozwiązanie zadania,

φ - obszar dopuszczalny wektora x^M .

Ponieważ z założenia:

$$e_R \Rightarrow \max \quad \text{to} \quad \begin{cases} W_1 \Rightarrow \max, \\ E_r \Rightarrow \min, \\ \varphi_0 \Rightarrow 1, \\ \varphi_{bio} \Rightarrow 1 \end{cases} \quad (40)$$

więc poszukiwaną wartość wskaźnika e_R otrzymuje się dla:

$$e_{Rx} = e_R(C_{kx}, C_{rx}) \quad (41)$$

gdzie:

C_{kx} - poszukiwane cechy konstrukcyjne zespołu rozdrabniającego i napędowego,

C_{rx} - poszukiwane cechy ruchu elementów rozdrabniania.

Zależność (41) stanowi ogólną odpowiedź i rozwiązanie zadania polegającego na poszukiwaniu najkorzystniejszej postaci rozdrabniacza ze względu na rozdrabniany materiał i realizowany proces techniczny.

4.3. Metodyka badań nad cechami wytrzymałościowymi i właściwościami ziaren

Przyrządy wytrzymałościowe przedstawione na rysunku 7 służą do pomiaru obciążeń i odkształceń nasion w warunkach maszyny wytrzymałościowej i rozdrabniacza.

W programie badań obciążeń rozdrabniających wyróżniono: modelowanie fizyczne quasi-ścianania, ściskanie - jako model rozdrabniania bijakowego, zmiany prędkości elementu rozdrabniającego.

Praca rozdrabniania wyznaczana jest na podstawie całkowania przebiegów z prób wytrzymałościowych lub - w przypadku rozdrabniania maszynowego - przebiegów rzeczywistych charakterystyk ruchowych maszyny za pomocą systemu PSI - AMSTRAD - PC 1512. Zakres zmienności cech konstrukcyjnych modelu wytrzymałościowego rozdrabniacza podano w tabeli 3. Badania realizowano na przyrządzie wytrzymałościowym (rys.6), przez ściskanie i rozciąganie płaskowników z otworami.

Badaniom podlegają następujące właściwości materiału badanego: wilgotność, zespół właściwości geometrycznych, stopień czystości, zawartość suchej masy i popiołu. Wartości liczbowe tych właściwości określano na podstawie technik opisanych w literaturze [20, 79, 151]. Wyjaśnienia wymaga jedynie technika wyznaczania zredukowanej średnicy ziarna. Korzystając ze znanej w rolnictwie wartości masy 1000 ziaren określa się z odpowiednio dużej liczby ziaren zredukowaną czy równoważną średnicę ziarna d_z , odpowiadającą średnicy kuli o objętości ziarna:

$$d_z = \sqrt[3]{\frac{6 V_z}{\pi}} = 1,24 \sqrt[3]{\frac{m_0}{z \cdot \rho_m}}$$

gdzie:

d_z - zredukowana średnica ziarna,

V_z - zredukowana objętość ziarna,

m_0 - masa próbki ziaren,

z - liczba ziaren w próbce,

ρ_m - gęstość masy.

Tabela 3

Zakresy zmienności cech konstrukcyjnych zespołu rozdrabniającego

Lp.	Cecha konstrukcyjna (MR)	Zakres badany	
		Model	Maszyna
1	2	3	4
1	Grubość tarcz h_i	1,8; 10 mm	8 ... 10 mm
2	Szczelina S_i	0,05; 0,1 mm	0,8 ... 2,4 mm
3	Średnica otworów d_i	5; 10; 15 mm	5; 10; 15; 25 mm
4	Kąt krawędzi otworów γ_i	60°; 75°; 90°	60°; 75°; 90°
5	Podziałka obwodowa t_o	25 mm	20 ... 25 mm
6	Podziałka promieniowa t_r	-	20 ... 25 mm
7	Chropowatość R_a	2,5 - 20 μ m	1,63 - 10 μ m
8	Średnica zewnętrzna tarcz D_z	-	120 + 250 mm
9	Średnica rozmieszczenia otworów w tarczach	-	92,60 + 226 mm
10	Liczba tarcz	3	3 ... 11 sztuk
11	Rodzaj ruchu	prostoliniowy	obrotowy
12	Kąt osi obrotu tarcz roboczych	niezmienny	0 ... $\frac{\pi}{2}$
13	Zasilanie materiałem	okresowe	stabilizowane
14	Liczba otworów w tarczy	max. 15 sztuk	2 ... 44 sztuk

Rozkład granulometryczny produktu rozdrabniania określano jako średni wymiar cząstek M ([79] - s. 66).

Zakres badawczy cech konstrukcyjnych modelu wytrzymałościowego podano w tabeli 3 (kolumna 3).

4.4. Metodyka badań i kryteria oceny zespołu roboczego rozdrabniacza

Dobór cech konstrukcyjnych wielotarczowego rozdrabniacza ziaren zbóż realizowany był w oparciu o wyniki procesu rozdrabniania. Zakres zmienności cech konstrukcyjnych zespołu rozdrabniającego podano w tabeli 3, natomiast zmienność cech ruchu elementów rozdrabniania zestawiono w tabeli 4. Wśród cech konstrukcyjnych badano przede wszystkim wpływ postaci geometrycznej elementu rozdrabniającego, wymiarów kątów krawędzi uczestniczących w rozdrabnianiu i wymiarów nierówności powierzchni transportujących rozdrobniony materiał.

Do oceny zmiennych wynikowych wykorzystano wskaźniki wymienione w podrozdziale 3.3. Jako podstawowe kryterium oceny jakości konstrukcji stosowano model energetycznej efektywności rozdrabniania ziaren zbóż o postaci (32). W grupie wielkości stałych wyróżniono właściwości materiału rozdrabnianego oraz stabilizowane warunki otoczenia.

Tabela 4

Zakresy zmienności cech ruchu układu funkcjonalnego

Lp.	Parametr	Zakres zmienności
1	2	3
1	Prędkość liniowa otworów w tarczach v_i	0 ... 15,60 m/s
2	Różnica prędkości między tarczami $\Delta \omega_i$	0 ... 157,8 rad/s
3	Nierównomierność kinematyczna Δ_k	2,2 ... 16,90 %
4	Nierównomierność dynamiczna Δ_d	1,95 ... 32,80 %
5	Nierównomierność ruchu Δ_r, η	3,33 ... 54,40 %
6	Sterowanie prędkością wału rozdrabniacza b	bezstopniowy, stopniowy, mieszany
7	Przepływ masy przez rozdrabniacz S	szczelinowy, pionowy, złożony
8	Szczelina zasilająca F_2	0 ... 0,067 m ²
9	Kierunek obrotów	współbieżny, przeciwbieżny
10	Odbiór produktu	okresowy, ciągły
11	Masa rozdrobnionego ziarna	ponad 44 000 kg
12	Łączny czas użytkowania rozdrabniacza	ponad 1 200 h
13	Łączny czas użytkowania układu napędowego	ponad 2 500 h

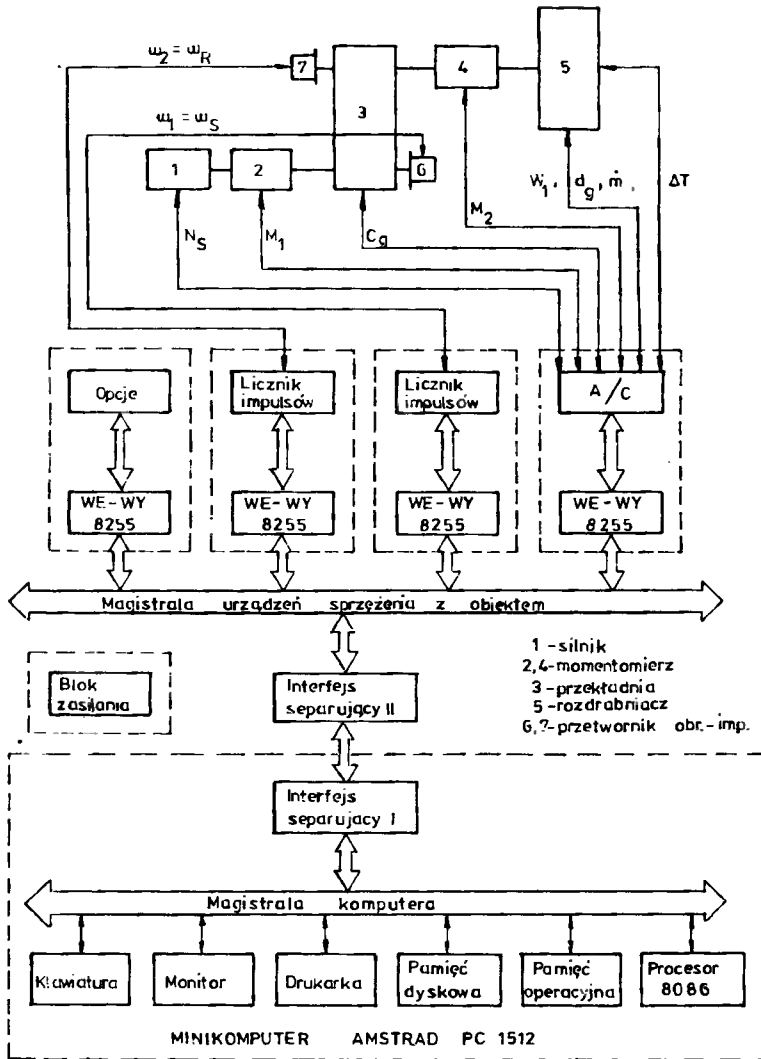
4.5. Metodyka badań przekładni

Istota badań układu napędowego polega na wykorzystaniu właściwości momentu obrotowego oporów rozdrabniania jako momentu hamującego przekładnię. Konsekwencją przyjętego założenia jest możliwość zastosowania procedur komputerowych do wyznaczania wskaźników opisujących zmienne napędowo-funkcjonalne (zależności (3) do (32)). Zakres zmienności cech ruchu, jako konsekwencja sterowania parametrami przekładni BPI i pasowo-zębatej, podano w tabeli 4.

Do wielkości stałych zalicza się warunki trybologiczne współpracujących par kinematycznych w przekładni, stan napięcia wstępnego i temperaturę otoczenia badanego układu.

4.6. Metodyka rejestracji wyników i obliczeń

Kolejnym elementem badań doświadczalnych są techniki pomiaru i gromadzenia dokumentacji badawczej oraz analizy statystycznej i merytorycznej wyników badań, które przeprowadzono za pomocą pomiarowego systemu PSI - AMSTRAD - PC 1512.



Rys.17. Elementy systemu pomiarowego PSI - AMSTRAD - PC 1512

System umożliwia zbieranie danych pochodzących od (rys.17):

- dwóch przetworników momentu obrotowego M_1 i $M_2 = M_R$, lub siły rozdrabniającej P_R na stanowisku wytrzymałościowym,
- trzech przetworników strumienia masy \dot{m} - do określenia natężenia przepływu masy oraz wskaźników energetycznych,
- przetwornika przyrostu temperatury produktu ΔT ,
- rejestratora wielkości cząstek d_g ,
- rejestratora wybranych cech konstrukcyjnych - głównie geometrycznych C_g - układu technicznego lub wybranych właściwości materiału ziarnistego, np. wilgotności,
- co najmniej dwóch przetworników obrotowo-impulsowych typu CPPC do określania składników charakterystyk ruchowych.

Parametry sygnałów wejściowych pobieranych z przetworników obrotowo-impulsowych:









- sygnał impulsowy o amplitudzie ± 12 V,
- maksymalna częstotliwość pracy 40 kHz, co daje możliwość pomiaru prędkości obrotowej do 5000 min^{-1} (prędkość kątowa do 525 rad/s).

Pozostałe przetworniki i rejestratory przystosowane są do współpracy z tensometrycznym mostkiem dynamicznym (np. TDA-6) lub przetwornikami wskaźnikowymi (np. WT-1) o następujących parametrach sygnałów wejściowych:

- napięcie w przedziale ± 2 V,
- maksymalna częstotliwość sygnału 300 Hz.

Częstotliwość próbkowania sygnałów zmienia się w granicach od kilkudziesięciu Hz do 300 Hz. Czas pomiaru - zależny od częstotliwości - od $2 \cdot 10^{-3}$ s do kilku sekund. Bliższy opis systemu pomiarowego zamieszczono w kilku publikacjach [41, 48, 55, 57].

Do grupy podstawowych nośników informacji zalicza się dyskietki elastyczne 5 1/4 cala, karty badań modelowych (rys.18) i wykresy obciążeń oraz przemieszczeń z maszyny wytrzymałościowej.

WYDZIAŁ MECHANICZNY ATR Bydgoszcz									
Obiekt badań			OB						
1 	P J Z 0	2 	P J Z 0						
3 	P J Z 0	4 	P J Z 0						
Model obciążenia			MO						
CS 	IP J Z 0	CZ 	P J Z 0						
CI 	P J Z 0	CN 	P J Z 0						
Wyniki badań									
- temperatura otoczenia:		<input type="text"/> °C	<input type="text"/> K						
- wilgotność względna otoczenia:		<input type="text"/> %							
- wilgotność względna ziarna:		<input type="text"/> %							
Aparatura									
Obciążenia:									
zakres:	czas:	prędkość posuwu:							
F	t	V _p							
Rejestracja: przełożenie									
Wyniki pomiarów:									
Lp	F	Δl	l	f	Lp	F	Δl	l	f
1					6				
2					7				
3					8				
4					9				
5					10				
Uwagi dotyczące pękania:									

Rys.18. Karta informacyjna badań modelowych [44]

W karcie badań modelowych zamieszczono informacje o:

- obiekcie badań (ziarna całe, połówki, ćwiartki); P - pszenica, J - jęczmień, Z - żyto, O - owies, PZ - pszenżyto,
- modelu obciążenia: CS - ściskanie, CZ - cięcie ze zginaniem, CI - cięcie impulsowe, CN - obciążenie cykliczne,
- warunkach otoczenia pomiarowego,
- parametrach aparatury, sposobie realizacji obciążenia: F - zakresie siły, t - czasie działania, v_p - prędkości przesuwu elementu zadającego obciążenie, przełożeniu między elementem wykonawczym i rejestrującym,
- wynikach pomiarów: F - siły, Δl - odkształcenia, l - wymiaru początkowego, σ - naprężenia,
- uwagach dotyczących pęknięcia ziarna, miejscu inicjacji, kierunku rozchodzenia, powierzchni otwarcia bielma, stopniu uszkodzenia łuski itp.

Obliczenia statystyczne realizowano w oparciu o programy MAKSTEPREGR [4, 9] oraz MODEL QUASI-ŚCINANIA, który opracowano specjalnie do potrzeb specyfiki eksperymentu z zakresu podstaw konstrukcyjnych budowy rozdrabniaczy wielotarczowych. Dokumenty badań, programy, procedury i wyniki pomiarów oraz analiz znajdują się w archiwum KMIPR ATR w Bydgoszczy.

Jako podstawową wielkość estymacji parametrów modelu przyjęto funkcję Q - jakości modelu. Jest to miara różnicy między modelem a obiektem rzeczywistym. Funkcja jakości modelu jest normą określoną na sygnałach wyjściowych modelu i obiektu przy założeniu, że sygnały wejściowe są identyczne [68, 69]:

$$Q = \| z^* - z \| \quad (42)$$

gdzie:

- z^* - odpowiedź układu rzeczywistego,
- z - odpowiedź modelu.

Możliwość symulowania cech konstrukcyjnych wielootworowego pakietu tarcz w programie „MODEL QUASI-...” wspomaga proces konstruowania rozdrabniaczy wielotarczowych w zakresie doboru liczby tarcz, średnicy rozmieszczenia otworów na tarczach, warunków brzegowych, łącznej powierzchni quasi-ścianania, przekroju przepływu materiału, chwilowych oporów rozdrabniania w zależności od rodzaju rozdrabnianego ziarna i warunków skrawania.

4.7. Metodyka badań porównawczych

Porównawcze badania prowadzono głównie dla maszyn oraz niektórych materiałów. Dotyczy to rozdrabniaczy bijakowych, śrutowników tarczowych i walcowych oraz granulatu i regranulatu tworzyw wielkocząsteczkowych. Prezentację uzyskanych wyników ogranicza się do podstawowych zestawień, dających rozeznanie o miejscu rozdrabniaczy wielotarczowych w inżynierii rozdrabniania pasz.

5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

5.1. Zestawienia wyników badań

Zestawienie wyników wstępnych do wyznaczenia podstawowych charakterystyk strumienia napędowego podano na przykładzie tabeli 5, w której zawarto informacje o chwilowych wartościach:

- prędkości kątowej wału wejściowego przekładni napędzającej rozdrabniacz w_1^* , rad/s,
- prędkości kątowej wału wyjściowego przekładni i jednocześnie wejściowej rozdrabniacza w_2 , rad/s,
- momentu obrotowego na wale silnika i przekładni M_1 , Nm,
- momentu obrotowego na wale wyjściowym przekładni i wejściowym rozdrabniacza M_2 , Nm,
- mocy w strumieniu napędowym między silnikiem i przekładnią N_1 , W,
- mocy w strumieniu napędowym między przekładnią i rozdrabniaczem N_2 , W,
- przełożenia kinematycznego realizowanego przez przekładnię mechaniczną IK , -,
- przełożenia dynamicznego realizowanego w strumieniu napędowym przekładni mechanicznej ID , -,
- współczynnika sprawności mechanicznej układu badawczego ETA , -,
- współczynnika sprawności mechanicznej obiektu badań, w przypadku tabeli 5: przekładnia pasowo-zębata BANDO (Japonia), -,
- wartości średnich dla przebiegów chwilowych.

Ponadto w dolnej części tabeli podano wartości stopnia nierówności kinematycznej DK (Δ_K), dynamicznej DD (Δ_D) i ruchu DR (Δ_p).

Przykładowe wyniki badań wstępnych przekładni zamieszczono na początku rozdziału, ze względu na całościowy charakter zapisu tabulogramowego. Wyniki badań wstępnych i zasadniczych dla materiału i procesu rozdrabniania grupowane są w ramach zagadnienia oraz podlegają sekwencyjnej analizie matematycznej.

Zestawienie statystycznej analizy regresji i korelacji pracy rozdrabniania ziaren zbóż (P lub L), dla zmiennej prędkości zadawania obciążeń w warunkach quasi-ścianania, podano na przykładzie tabeli 7. Natomiast interpretację graficzną wyników, dla zmiennej liczby ziaren ścinanych w modelu rozdrabniacza (wg rys.7a), pokazano na rysunku 19.

*

W tabeli 5 zastosowano oznaczenia wynikające z procedury działania systemu PSI - AMSTRAD - PC 1512.

Tabela 5

Zestawienie danych o chwilowych przebiegach podstawowych charakterystyk ruchu. Przekładnia pasowo-zębata, silnik elektryczny 1,5 kW, rozdrabniacz wielotarczowy

W1	W2	M1	M2	N1	N2	IK	ID	ETA	ETA0
37,12	37,05	14,83	15,35	550,35	568,54	1,00	0,97	0,9680	0,9878
36,43	36,44	16,32	17,06	594,48	621,52	1,00	0,96	0,9565	0,9760
37,94	37,87	13,18	13,73	500,25	520,25	1,00	0,96	0,9617	0,9813
36,35	36,35	16,52	17,11	600,49	621,80	1,00	0,97	0,9657	0,9854
37,10	37,06	15,07	15,69	559,30	581,51	1,00	0,96	0,9618	0,9814
37,47	37,42	14,33	14,91	536,83	557,86	1,00	0,96	0,9623	0,9819
37,86	37,81	13,38	14,13	514,25	534,10	1,00	0,96	0,9628	0,9825
36,88	36,83	15,62	16,18	576,17	595,77	1,00	0,97	0,9671	0,9869
37,15	37,10	14,93	15,52	554,02	575,16	1,00	0,96	0,9632	0,9829
DK=0,001		DD=0,006		DR=0,007					
W1	W2	M1	M2	N1	N2	IK	ID	ETA	ETA0
48,04	47,94	10,65	11,24	511,43	538,86	1,00	0,95	0,9491	0,9685
46,97	46,94	12,89	13,49	605,21	633,25	1,00	0,96	0,9557	0,9752
47,74	47,64	11,19	11,88	534,41	565,81	1,00	0,94	0,9445	0,9638
47,56	47,51	11,54	12,27	548,93	582,90	1,00	0,94	0,9417	0,9609
47,46	47,39	11,89	12,46	564,38	590,62	1,00	0,95	0,9556	0,9751
46,67	46,63	13,38	14,08	624,54	656,36	1,00	0,95	0,9515	0,9709
48,08	48,01	10,95	11,58	526,25	556,13	1,00	0,94	0,9463	0,9656
47,54	47,45	11,69	12,27	555,81	582,13	1,00	0,95	0,9548	0,9743
47,51	47,44	11,77	12,41	558,87	588,26	1,00	0,95	0,9499	0,9693
DK=0,001		DD=0,011		DR=0,011					

Tabela 6

Charakterystyka materiału ziarnistego

Rodzaj ziarna	Masa 1000 ziaren g	Gęstość kg/m ³	Stopień czystości %	Sucha masa %	Popiół %	Wilgotność %	Średnica zredukowana mm
1	2	3	4	5	6	7	8
Pszenżyto	36,8	1220	98,0	88,1	1,8	12,8	4,02
Żyto	46,9	1225	98,5	86,1	2,0	12,8	4,18
Pszenica	37,6	1210	98,0	87,4	1,9	12,9	3,90
Jęczmień	45,5	1196	97,0	86,6	3,0	12,9	4,17
Owies	19,3	1102	96,8	87,0	3,1	13,1	3,21

Podobnymi zestawieniami i interpretacjami graficznymi dysponowano w przypadku ustalania naprężeń zastępczych przy quasi-ściananiu (np. tabela 8 i rys.20). Wykresy naprężeń zastępczych dotyczą zmiennej liczby nasion w przyrządzie rozdrabniającym ($N=1$, $N=5$, $N=10$, $N=15$) i przy zmiennej prędkości zadawania obciążeń (0 - 1000 mm/min).

Proces rozdrabniania analizowano statystycznie na podstawie rezultatów wyników opracowanych w postaci tabeli 9, w której scharakteryzowano zmienne parametry maszyny dla zadanych cech konstrukcyjnych, np. kąt krańdźwi tnącej $\gamma = 90^\circ$ i podstawowe parametry statystyczne. Analizy wartości biologicznej produktu rozdrabniania dokonywano w oparciu o dane według tabeli 10 i zestawienia według tabeli 11.

Wyniki badań wstępnych oraz struktura sekwencyjna eksperymentu pozwoliły na przeprowadzenie postępowania zmierzającego do określenia modelu konstrukcyjnego rozdrabniacza wielotarowego.

5.2. Zależność pracy odkształcenia trwałego od rodzaju ziarna i prędkości zadawania obciążeń

W tabeli 7 i na rysunku 19 zaprezentowane przykładowe wyniki oraz interpretacje graficzne dotyczą ziarna o stabilizowanej wilgotności (według tabeli 6), wymiarów odpowiadających przekrojowi rzeczywistemu i zastępczemu w przeliczeniu na jedno ziarno w warunkach dwucięcia, szerokości płaskownika $h_2 = 1$ mm, średnicy otworów w płaskownikach $d_1 = 10$ mm.

Na rysunku 21 podano przykładowy przebieg energii $E_{T\lambda}$, potrzebnej do realizacji odkształcenia trwałego ziaren pszenżyta do zadanego stopnia rozdrobnienia, w warunkach zmiennej prędkości quasi-ścianania.

Praca odkształcenia trwałego, w warunkach modelowych quasi-ścianania technicznego ziaren podstawowych zbóż, istotnie maleje ze wzrostem prędkości liniowej zadawania obciążeń. Wpływ prędkości zadawania obciążeń rozdrabniających można identyfikować równaniami, których współczynniki są istotne na poziomie $\alpha = 0,05$:

- praca na odkształcenie trwałe gramowej próbki pszenżyta

$$E_{T\lambda} = -8,8654 \cdot 10^{-4} \cdot v_r + 0,6928, \text{ dla } R = -0,9567 \quad (43)$$

- praca na odkształcenie trwałe gramowej próbki pszenicy

$$E_{T\lambda} = -1,9391 \cdot 10^{-4} \cdot v_r + 0,4651, \text{ dla } R = -0,7430 \quad (44)$$

- praca na odkształcenie trwałe gramowej próbki żyta

$$E_{T\lambda} = -10,795 \cdot 10^{-4} \cdot v_r + 0,7057, \text{ dla } R = -0,8723 \quad (45)$$

- praca na odkształcenie trwałe gramowej próbki owsa

$$E_{T\lambda} = -18,976 \cdot 10^{-4} \cdot v_r + 1,7481, \text{ dla } R = -0,8858 \quad (46)$$



- praca na odkształcenie trwałe gramowej próbki jęczmienia

$$E_{T\lambda} = -11,573 \cdot 10^{-4} \cdot v_r + 0,9252, \text{ dla } R = -0,8974 \quad (47)$$

Podane zależności dotyczą zakresu prędkości rozdrabniania:

$$0,1234 \cdot 10^{-2} \text{ m/s} < v_r < 16,987 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

i kąta ostrza krawędzi otworu rozdrabniającego $\gamma = \pi/2$ (90°).

Tabela 7

Wyniki analizy statystycznej pracy mechanicznej P dla pszenżyta
w = 12,8 %, N = 15

ANALIZA REGRESJI I KORELACJI - LINIOWA FUNKCJA REGRESJI
PSZENŻYTO N=15 praca

XX

LP	X(I)	Y(I)	Y^(I)	Y(I)-Y^(I)
1	10	0.6704	0.68394	-1.3540*10-02
2	50	0.6040	0.64847	-0.0444478
3	100	0.6032	0.60415	-9.5148*10-04
4	200	0.6056	0.51549	9.0103*10-02

FUNKCJA POSTACI $Y(X)=A1*X+A2$ O KOLEJNYCH WSPÓŁCZYNNIKACH

$$A1 = -8,865477 \cdot 10^{-04}$$

$$A2 = 0.6928$$

$$A3 = 0$$

ŚREDNIA ARYTMETYCZNA ZMIENNEJ X=172

ŚREDNIA ARYTMETYCZNA ZMIENNEJ Y=0.5403201

WSPÓŁCZYNNIK KORELACJI R=-0.956712

ŚREDNIO-KWADRATOWY BŁĄD APROKSYMACJI =4.7435*10-02

ANALIZA REGRESJI I KORELACJI - LINIOWA FUNKCJA REGRESJI
PSZENŻYTO N=15 WPNZ praca

XX

LP	X(I)	Y(I)	Y^(I)	Y(I)-Y^(I)
1	10	4.469*10-02	4.559*10-02	-9.027*10-04
2	50	4.026*10-02	4.323*10-02	-0.296*10-03
3	100	4.021*10-02	4.027*10-02	-6.342*10-05
4	200	4.037*10-02	3.436*10-02	6.006*10-03

FUNKCJA POSTACI $Y(X)=A1*X+A2$ O KOLEJNYCH WSPÓŁCZYNNIKACH

$$A1 = -5.91031 \cdot 10^{-05}$$

$$A2 = 4.61870 \cdot 10^{-02}$$

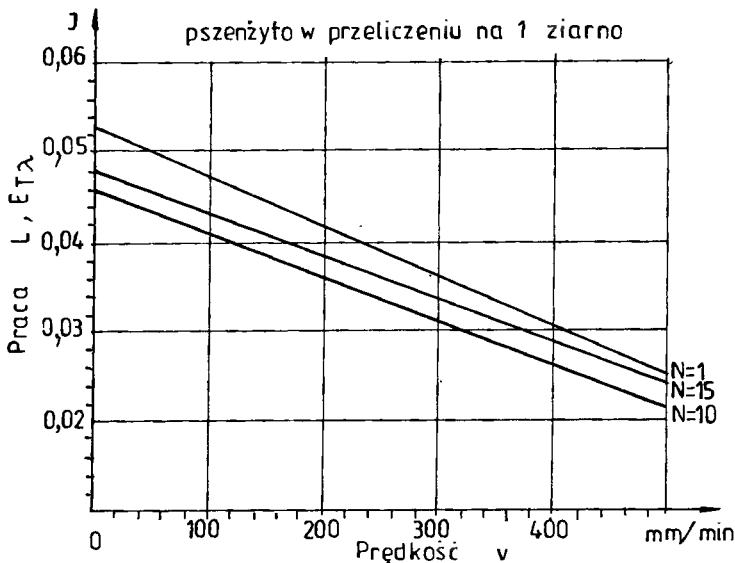
$$A3 = 0$$

ŚREDNIA ARYTMETYCZNA ZMIENNEJ X=172

ŚREDNIA ARYTMETYCZNA ZMIENNEJ Y=3.6021*10-02

WSPÓŁCZYNNIK KORELACJI R=-0.95678

ŚREDNIO-KWADRATOWY BŁĄD APROKSYMACJI =3.162342*10-03

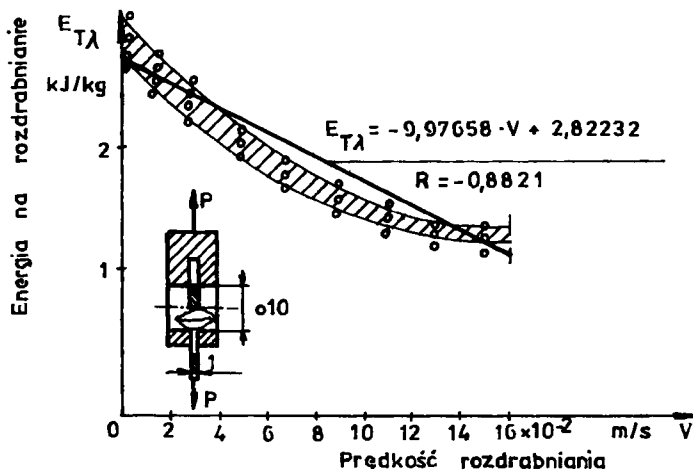


Rys.19. Praca odkształcenia trwałego $L = P$, warunki modelowe dla zmiennej liczby ziaren w przyrządzie $N = 1; 10; 15$ sztuk i zmiennej prędkości cięcia v

Jednostkowe zużycie energii przy rozdrabnianiu modelowym ziaren podstawowych zbóż w próbkach gramowych ma się jak: pszenica 100 %, pszenżyto 150 %, żyto 152 %, jęczmień 200 %, owies 369 %, a w przeliczeniu na pojedynczy, zastępczy przekrój ziarna, jak: pszenica 100 %, pszenżyto 148 %, żyto 151 %, jęczmień 196 %, owies 375 %. Pszenica, pomimo najmniejszego zużycia jednostkowego energii, ma niską dynamikę spadku zużycia energii ze wzrostem prędkości - zależność (44). Jest to jednocześnie najniższa wartość współczynnika kierunkowego prostej regresji, jaki zanotowano w badaniach. Wysoka dynamika spadku zużycia energii na rozdrabnianie owsa ($18,976 \cdot 10^{-4}$ J/g na jednostkę prędkości) świadczy o szczególnej podatności tego ziarna - z dużą zawartością plewy (22 % - 19 %) - na kierunek jej obniżania związany ze wzrostem prędkości rozdrabniania i quasi-ścianiem technicznym.

Próby prowadzone dla ściskania gramowych próbek wymienionych gatunków zbóż wykazują znaną prawidłowość wzrostu zużycia energii na odkształcenie trwałe ziaren ze wzrostem prędkości zadawania obciążeń (dla wyznaczonych przedziałów ufnosci [41]).

Liczba ziaren w próbce wytrzymałościowej wpływa istotnie na przebiegi pracy odkształcenia trwałego. Istotność występuje dla liczebności do 10 sztuk ziaren w modelu. Powyżej 11 ziaren w przyrządzie wytrzymałościowym wpływ liczby ziaren jest nieistotny. Większa liczba ziaren w przyrządzie wytrzymałościowym jest wskazana, ze względu na wysoką reprezentatywność masową, ale powyżej 250 mm² przekroju ścinanego występują oddziaływania przyrządu na wskazania aparatury pomiarowej. Ustalono więc, że całkowita powierzchnia quasi-ścianienia nie będzie większa od 200 mm², co odpowiada przypadkowi dwucięcia gramowej próbki ziaren podstawowych zbóż.



Rys.20. Zależność pracy odkształcenia trwałego od prędkości zadawania obciążenia przy quasi-ściananiu masowych próbek pszenżyta

Zapotrzebowanie energii na realizację rozdrabniania kilogramowych próbek pszenżyta do średniego wymiaru cząstek $d_g = 1,3348$ mm, pokazane na rysunku 20 dla zmiennych prędkości rozdrabniania, pozwala się uogólnić do postaci prostej liniowej funkcji regresji:

$$E_{T\lambda} = -9,9765 \cdot v_r + 2,8223, \quad \text{dla } R = -0,8821 \quad (48)$$

dla prędkości rozdrabniania z przedziału $(0,1234 \cdot 10^{-2} - 16,987 \cdot 10^{-2})$ m/s. Najwyższa wartość energii potrzebnej do rozdrobnienia próbek masowych występuje w warunkach porównywalnych z próbami statycznymi (poniżej $0,12 \cdot 10^{-2}$ m/s) - około 2,76 kJ/kg. Jest to jednak wartość o kilka razy niższa od energii potrzebnej na realizację zjawiska w warunkach maszynowych - technologicznych.

Możliwości wykorzystania prezentowanych funkcji są ograniczone. Nie ma rozdrabniania maszynowego w tak niskim zakresie prędkości, nie ma jednocześnie możliwości prowadzenia prób wytrzymałościowych dla wyższych prędkości belki. Jako składowe do określania względnej sprawności rozdrabniania przyjmuje się najwyższe wartości pracy odkształcenia trwałego (jako najmniej korzystne) ze względu na zjawiska towarzyszące zmianie prędkości i cech konstrukcyjnych elementu rozdrabniającego:

- pszenżyto $E_{T\lambda} = 2,8223$ kJ/kg, 123,9 %
- pszenica $E_{T\lambda} = 2,3256$ kJ/kg, 100,0 %
- żyto $E_{T\lambda} = 3,1756$ kJ/kg, 136,5 %
- owies $E_{T\lambda} = 5,2443$ kJ/kg, 234,0 %
- jęczmień $E_{T\lambda} = 3,2382$ kJ/kg, 139,2 %

Przyczyny takiego stanu pracy odkształcenia trwałego wiążą się ze sposobem ustawienia ziarna lub jego części w przyrządzie modelowym. Inne wyniki - dla tych samych przekrojów - uzyskiwano dla hybrydów: łuska - bielmo - łuska, łuska - bielmo, bielmo - łuska. Podane rezultaty dotyczą losowego ustawienia nasion i ich części w przyrządzie dla kilogramowych próbek masowych.

5.3. Zależność naprężeń od rodzaju ziarna i prędkości zadawania obciążeń

Przykładowe zestawienie analizy statystycznej naprężeń w funkcji zmiennej prędkości zadawania obciążeń, liczby i rodzaju nasion w modelu quasi-ścianania podano w tabeli 8.

Tabela 8

Wyniki analizy statystycznej naprężeń N dla pszenżyta; $w = 12,8\%$, $N = 15$

ANALIZA REGRESJI I KORELACJI - LINIOWA FUNKCJA REGRESJI PSZENŻYTO N=15 naprężenia

LP	X(I)	Y(I)	Y^(I)	Y(I)-Y^(I)
1	10	19.8394	17.75167	2.087732
2	50	16.8258	17.45186	-0.626064
3	100	17.3699	17.07711	0.292787
4	200	14.2726	16.32761	-2.055006
5	500	13.8959	14.07909	-0.183187
6	1000	10.8153	10.33156	0.483743

FUNKCJA POSTACI $Y(X) = A_1 * X + A_2$ O KOLEJNYCH WSPÓŁCZYNNIKACH

$A_1 = -7.495062 * 10^{-03}$

$A_2 = 17.82662$

$A_3 = 0$

$A_4 = 0$

ŚREDNIA ARYTMETYCZNA ZMIENNEJ X = 310

ŚREDNIA ARYTMETYCZNA ZMIENNEJ Y = 15.50315

WSPÓŁCZYNNIK KORELACJI R = -0.9021493

ŚREDNIO-KWADRATOWY BŁĄD APROKSYMACJI = 1.246791

ANALIZA REGRESJI I KORELACJI - LINIOWA FUNKCJA REGRESJI PSZENŻYTO N=15 WPNZ naprężenia

LP	X(I)	Y(I)	Y^(I)	Y(I)-Y^(I)
1	10	1.322627	1.183445	0.1391821
2	50	1.121723	1.163458	-4.1757 * 10 ⁻⁰²
3	100	1.157993	1.138474	1.9519 * 10 ⁻⁰²
4	200	0.951506	1.088507	-0.1370003
5	500	0.926393	0.938605	-1.2212 * 10 ⁻⁰²
6	1000	0.72102	0.688770	3.2249 * 10 ⁻⁰²

FUNKCJA POSTACI $Y(X) = A_1 * X + A_2$ O WSPÓŁCZYNNIKACH

$A_1 = -4.996708 * 10^{-04}$

$A_2 = 1.188441$

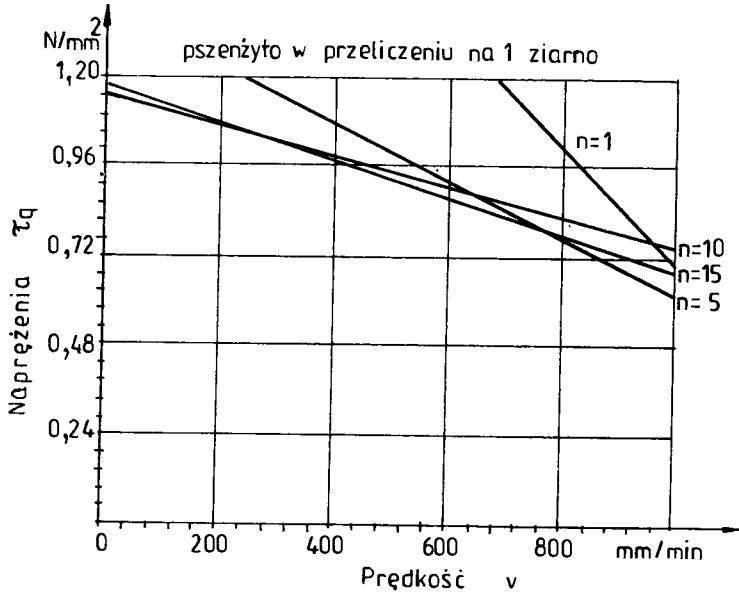
ŚREDNIA ARYTMETYCZNA ZMIENNEJ X = 310

ŚREDNIA ARYTMETYCZNA ZMIENNEJ Y = 1.033543

WSPÓŁCZYNNIK KORELACJI R = -0.9021494

ŚREDNIO-KWADRATOWY BŁĄD APROKSYMACJI = 8.311934 * 10⁻⁰²

Na rysunku 21 przedstawiono interpretacje graficzne przebiegów naprężeń w zależności od wyżej podanych zmiennych ($N=1, N=5, N=10, N=15, v_T$ od 0 do 1000 mm/min, pszenżyto).



Rys.21. Naprężenia zastępcze w warunkach quasi-ścianania; dla pszenżyta Largo, zmiennej liczby ziaren $n = 1; 5; 10; 15$ sztuk, w przyrządzie odcięcia pojedynczego nasion i zmiennej prędkości cięcia v

W górnej części tabeli 8 podano wartości naprężeń odnoszone do przekroju końca quasi-ścianania. Dolna część tabeli podaje wyniki analizy statystycznej dla przekroju początkowego i zastępczego, zgodnie z normą badań wytrzymałościowych. Naprężenia zastępcze są ilorzem maksymalnej siły ścinającej P_{rmax} przez pole F_0 przekroju początkowego próbki (PN-76/B-03200).

Podobnie jak praca odkształcenia trwałego, również naprężenia zastępcze w warunkach quasi-ścianania technicznego maleją istotnie ze wzrostem prędkości liniowej zadawania obciążenia. Wpływ ten można identyfikować liniową funkcją regresji, której współczynniki są istotne na poziomie $\alpha = 0,05$:

- dla pszenżyta

$$\tau_q = -4,9967 \cdot 10^{-4} \cdot v_T + 1,1884, \quad \text{dla } R = -0,9021 \quad (49)$$

- dla pszenicy

$$\tau_q = -2,8303 \cdot 10^{-4} \cdot v_T + 0,7665, \quad \text{dla } R = -0,9328 \quad (50)$$

- dla żyta

$$\tau_q = -5,3521 \cdot 10^{-4} \cdot v_T + 1,2643, \quad \text{dla } R = -0,9870 \quad (51)$$

- dla owsa

$$\tau_q = -9,0078 \cdot 10^{-4} \cdot v_r + 3,9946, \quad \text{dla } R = -0,9371 \quad (52)$$

- dla jęczmienia

$$\tau_q = -4,8067 \cdot 10^{-4} \cdot v_r + 1,2607, \quad \text{dla } R = -0,9354 \quad (53)$$

Podane zależności dotyczą prędkości rozdrabniania:

$$0,1234 \cdot 10^{-2} \text{ m/s} < v_r < 16,987 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

Dla podkreślenia dominującej składowej stosowano symbol naprężeń stycznych.

W przypadku naprężeń zastępczych nie ma istotnych różnic wartości (uwzględniając dokładność pomiaru i liczbę stopni swobody) dla ziaren podstawowych zbóż, poza pszenicą. Pszenica pomimo najniższych naprężeń zastępczych ma jednocześnie najniższą dynamikę ich spadku ze wzrostem prędkości zadawania obciążeń - zależność (50).

Fizyczna interpretacja zjawiska wiąże się ze stosunkiem wytrzymałości łuski pszenicy do wytrzymałości bielma. Łuska badanej pszenicy wykazywała porównywalną z bielmem wytrzymałość na quasi-ściananie, podczas gdy wytrzymałość łusek pozostałych ziarniaków była istotnie niższa od wytrzymałości na ściananie bielma (zależności (49), (51), (52) i (53)).

Podobnie jak dla pracy odkształcenia trwałego - badania prowadzono na losowo ustawionych w modelu hybrydach: łuska - bielmo, bielmo - łuska, łuska - bielmo - łuska (rys.18).

Istotnie mały spadek naprężeń ze wzrostem prędkości zadawania obciążeń rozdrabniających charakteryzuje głównie pszenicę. Pszenżyto, żyto i jęczmień należy do grupy ziaren o jednakowej dynamice spadku naprężeń ze wzrostem prędkości, około $5 \cdot 10^{-4} \text{ N/mm}^2$ na jednostkę prędkości. Owies w porównaniu z pszenicą ma trzykrotnie większą dynamikę spadku naprężeń, a w porównaniu z pozostałymi gatunkami ziaren dwukrotną. Dynamika spadku naprężeń wiąże się ze zmniejszeniem wartości siły maksymalnej na skutek rosnącej prędkości rozdrabniania.

Prędkość zadawania obciążeń w warunkach modelowych pozwala również ustalić kolejność ziaren zbóż według wartości naprężeń przy quasi-ściananiu: pszenica - 100,0 %, pszenżyto - 154,9 %, żyto - 164,0 %, jęczmień - 164,0 %, owies - 520,0 %.

Naprężenia przy quasi-ściananiu technicznym ziaren zbóż o podstawowych właściwościach fizycznych są niższe, niż przy ściskaniu do określonego odkształcenia trwałego o trudnym do ustalenia przyroście powierzchni właściwej. W przypadku dwucięcia według zasady quasi-ścianania technologicznego przyrost powierzchni właściwej jest równy $2F_r$. Dla pszenicy naprężenia przy quasi-ściananiu są kilka razy niższe, niż przy ściskaniu (do 9 razy) dla odmian miękkich, a dla odmian twardych nawet do 12 razy - w porównaniu z danymi zawartymi w pracy Kwiecińskiego [111] i wynikami pracy Kolowcy [102].

Naprężenia przy quasi-ściananiu są porównywalne, co do wartości, z naprężeniami przy rozłupywaniu. Dotyczy to danych z badań w odniesieniu do informacji zawartych w pracy [111].

Jako wartości naprężeń przydatne w budowaniu modelu merytorycznego przyjmuje się stan występujący przy prędkościach zadawania obciążenia zmierzających do zera (próby statyczne):

- pszenżyto	$\tau_{q \max} = \sigma_{\max} = 1,1884 \text{ MPa}$	154,9 %
- pszenica	$\tau_{q \max} = \sigma_{\max} = 0,7665 \text{ MPa}$	100,0 %
- żyto	$\tau_{q \max} = \sigma_{\max} = 1,2643 \text{ MPa}$	164,0 %
- owies	$\tau_{q \max} = \sigma_{\max} = 3,9946 \text{ MPa}$	520,0 %
- jęczmień	$\tau_{q \max} = \sigma_{\max} = 1,2607 \text{ MPa}$	164,0 %

5.4. Wyniki badań nad procesem rozdrabniania

Wyniki badań wydajności, jednostkowego zużycia energii, momentu obrotowego i mocy pobieranej przez złożony układ techniczny podano na przykładzie tabeli 9 i rysunków 22, 23, 24 i 25. Zestawienia wykonano dla jęczmienia, tylko zawartość frakcji pylistej na rysunku 25 dotyczy owsa. Na rysunku 26 zestawiono interpretacje graficzne wydajności i średniego wymiaru cząstek w początkowej fazie rozdrabniania wielotarczowego według zasady quasi-ścianania technologicznego.

Prezentowane wyniki dotyczą: średniej (dla 9 tarcz) średnicy rozmieszczenia otworów w tarczach $D_{o1} = 11,46 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, grubości tarczy stałej $h_1 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, grubości tarczy ruchomej $h_2 = 0,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, szczeliny między tarczami $s_1 = 0,156 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, średnic otworów w tarczach $d_1 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, zmiennego kąta krawędzi otworu przepustowo-rozdrabniającego 90° , 75° i 60° , podziałki obwodowej i promieniowej otworów $t_{o1} = t_{r1} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, średniej chropowatości tarcz $R_a = 10 \mu\text{m}$, średnicy zewnętrznej tarcz $D_{z1} = 18 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, bezstopniowej zmiany prędkości kątowej rozdrabniacza b_{sc} , przepływie masy przez rozdrabniacz po przejściu przez szczeliny między tarczami S_1 , mocy silnika $N_S = 1,5 \text{ kW}$.

Bardzo duże przyrosty wydajności rozdrabniania jęczmienia (tabela 9 i rysunek 24) spowodowane są zainicjowaniem trwałego odkształcenia i wzrostem liczby krawędzi realizujących rozdrabnianie. Dla prędkości obrotowej 120 1/min (średnia różnica prędkości liniowej między tarczami $\Delta v = 0,6 \text{ m/s}$) następuje zmiana współczynnika kierunkowego prostej regresji i dalsze rozdrabnianie realizowane jest z mniejszym przyrostem wydajności w funkcji rosnącej prędkości krawędzi rozdrabniającej. Ten punkt zmiany współczynnika kierunkowego prostej regresji jest jednocześnie zbliżony z wartością minimum jednostkowego zużycia energii przy rozdrabnianiu jęczmienia i ziaren podstawowych zbóż (rysunek 23, tabela 9, [41]), a nawet granulatu tworzyw wielkocząsteczkowych [56]. Prędkość liniowa krawędzi rozdrabniającej osiąga, dla minimum zużycia energii przy rozdrabnianiu ziarna zbóż, wartości z przedziału 0,82 m/s do 0,89 m/s.

Tabela 9

Wyniki analizy statystycznej quasi-ścianania technologicznego
ziarna jęczmienia w warunkach maszynowych, $w = 13,1\%$

DANE ZRODŁOWE - QUASI-ŚCIANANIE MASZYNOWE JĘCZMIENIA

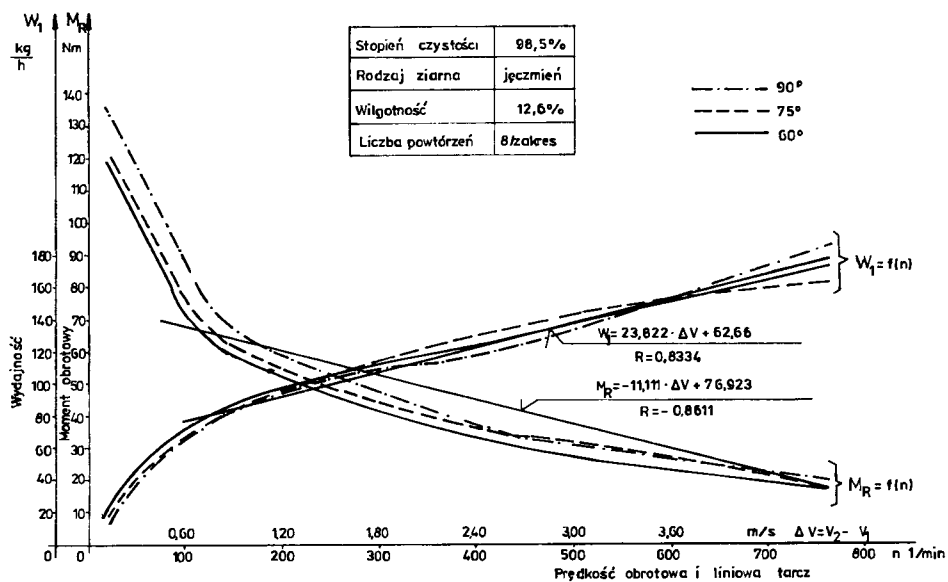
LP	CECHA 1	CECHA 2	CECHA 3	CECHA 4	CECHA 5
1	20	135	81.4	0.29	12.5
2	30	128	80.4	0.40	18.0
3	40	125	73.9	0.52	25.7
4	50	115	72.7	0.60	29.8
5	60	112	66.5	0.70	38.1
6	70	109	64.2	0.80	44.5
7	80	109	65.1	0.91	50.5
8	90	98	58.0	0.92	57.3
9	100	91	50.1	0.95	68.5
10	110	92	45.6	0.94	74.5
11	120	70	40.6	0.83	78.0
12	415	35	52.0	1.50	120.3
13	495	30	46.2	1.49	132.8
14	760	20	30.9	1.55	185.5

CECHA 1 - OBROTY WAŁU ROZDRABNIACZA [OBR/MIN]
 CECHA 2 - MOMENT NA WALE ROZDRABNIACZA [NM]
 CECHA 3 - JEDNOSTKOWE ZUŻYCIE ENERGII [KJ/KG]
 CECHA 4 - MOC POBIERANA PRZEZ SILNIK [KW]
 CECHA 5 - WYDAJNOŚĆ ROZDRABNIANIA [KG/H]

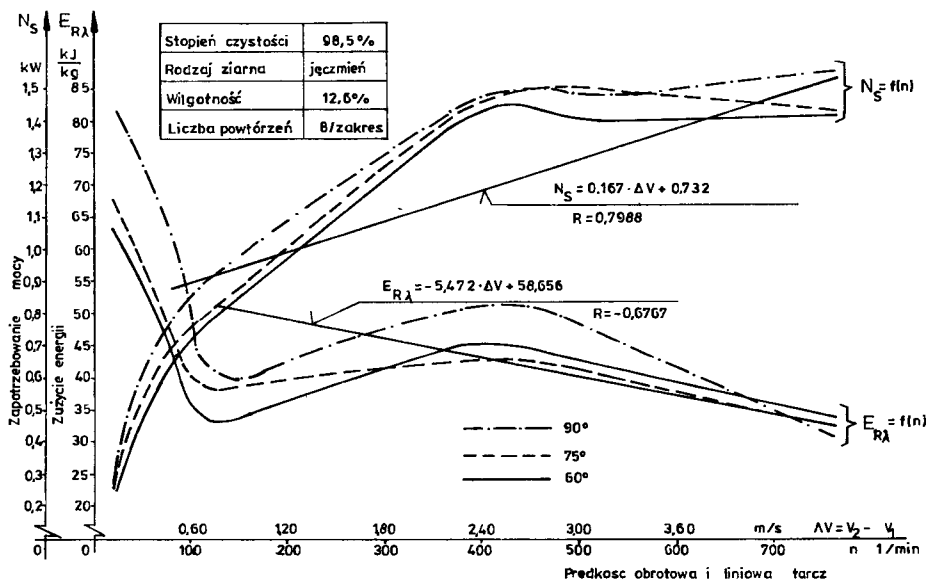
CECHA	ŚR. ARYTM.	ODCHYL. STAND.	WSKAŹNIK ZMIEN.
1	174.286	220.923	126.76
2	89.929	37.804	42.04
3	59.114	15.419	26.08
4	0.889	0.396	44.62
5	66.857	49.272	73.70

MACIERZ KORELACJI

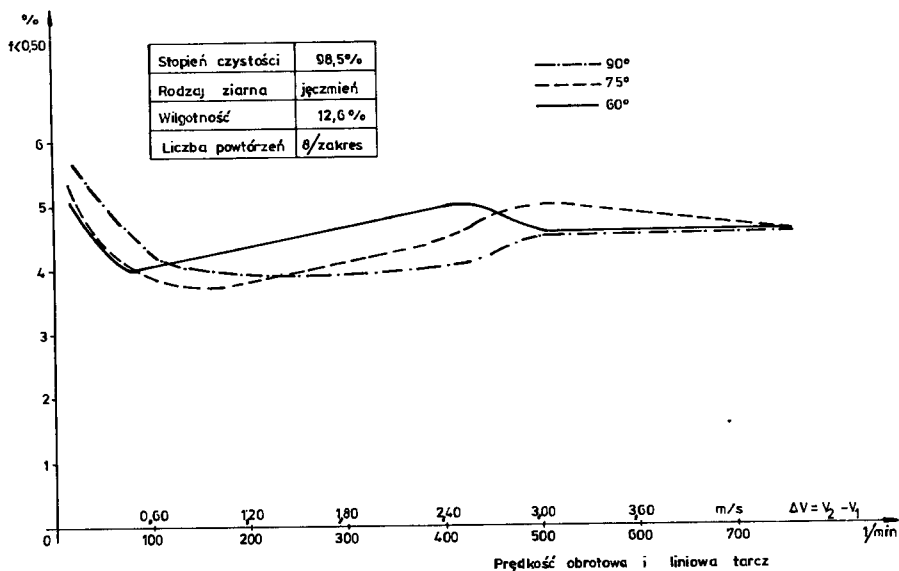
CECHA	1	2	3	4	5
1	1.000	-0.913	-0.720	0.872	0.960
2	-0.913	1.000	0.877	-0.960	-0.975
3	-0.720	0.877	1.000	-0.841	-0.879
4	0.872	-0.960	-0.841	1.000	0.946
5	0.960	-0.975	-0.879	0.946	1.000



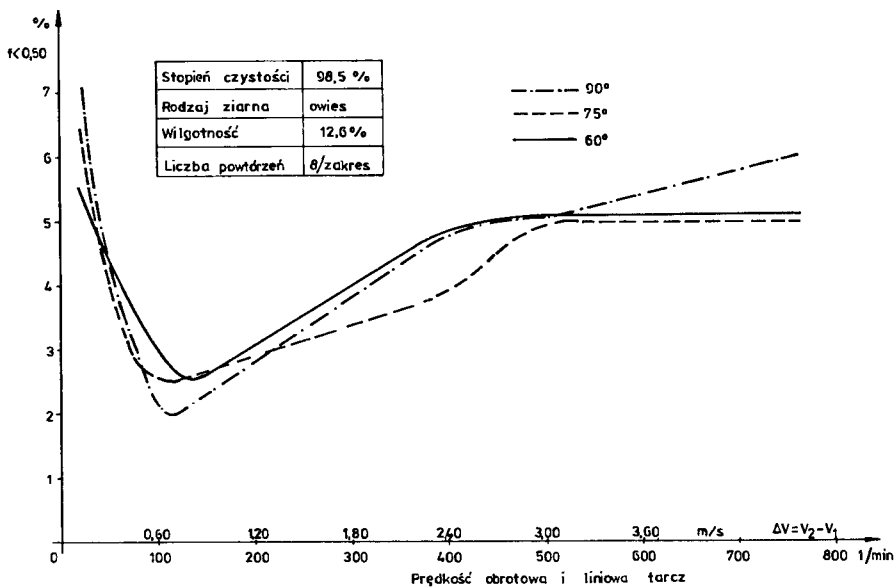
Rys.22. Wydajność i moment obrotowy na wale rozdzielacza wielotarczowego dla ziaren jęczmienia w zależności od prędkości krawędzi rozdrabniającej



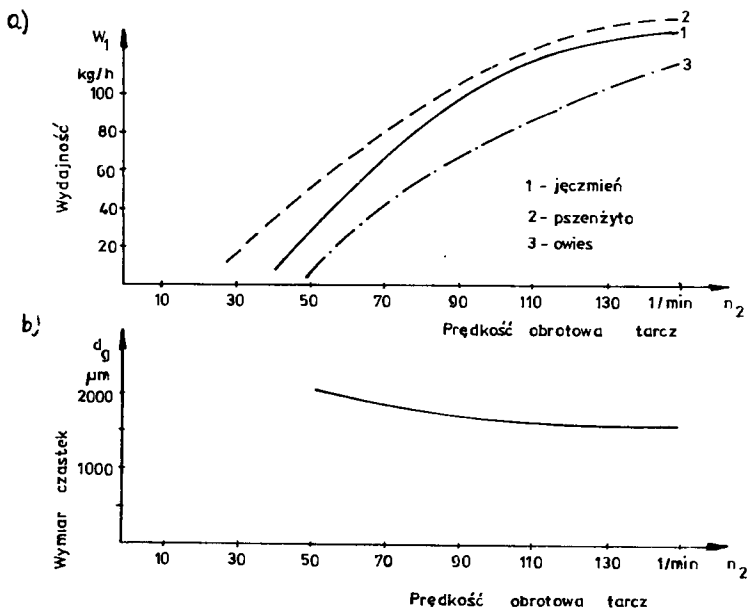
Rys.23. Zapotrzebowanie mocy i jednostkowe zużycie energii przy rozdrabnianiu ziarna jęczmienia ze zmienną prędkością krawędzi rozdrabniającej



Rys.24. Zmiany udziału frakcji o wymiarach mniejszych od 0,50 mm przy rozdrabnianiu jęczmienia ze zmienną prędkością krawędzi rozdrabniającej



Rys.25. Zmiany udziału frakcji o wymiarach mniejszych od 0,50 mm przy rozdrabnianiu owsa ze zmienną prędkością krawędzi rozdrabniającej



Rys.26. Przyrost wydajności i spadek średnich wymiarów cząstek w początkowej fazie realizacji rozdrabniania jęczmienia, pszenżyta i owsa (a); średnie wymiary cząstek dla pszenżyta (b)

Przedział prędkości, dla minimum zużycia energii przy rozdrabnianiu granulatu tworzyw wielkocząsteczkowych, opisują wartości liczbowe 0,77 m/s do 0,86 m/s [56].

Charakterystyka jednostkowego zużycia energii przy rozdrabnianiu ziaren podstawowych zbóż ma drugie minimum w zakresie prędkości krawędzi rozdrabniającej od 4,60 m/s do 5,15 m/s - dla jęczmienia o stabilizowanej wilgotności 13,1 % (rys.23).

Poza charakterystykami ruchowymi rozdrabniania również wielkości cząstek produktu rozdrabniania zależą od poziomu prędkości zadawania obciążeń trwałych. Dla zakresu prędkości liniowej, odpowiadającego minimum zużycia energii, występuje minimum ilościowego udziału frakcji śruty o wymiarach mniejszych od 0,50 mm (rys.24 - dla jęczmienia, rys.25 - dla owsa). Dla jęczmienia minimum udziału frakcji pylistej występuje dla kąta krawędzi tnącej 90° - w szerokim przedziale prędkości liniowej: od 0,77 m/s do 2,78 m/s. Dla innych kątów i rodzajów ziaren minimum to ma charakter punktowy.

Badania prowadzono z założeniem, że wszystkie cząstki po rozdrobieniu mają wymiar mniejszy od 2,00 mm.

Jak widać na rysunku 26 średni wymiar cząstek d_g systematycznie maleje ze wzrostem prędkości rozdrabniania powyżej 50 1/min (około 0,30 m/s). Jest to wynik zwiększającej się liczby oddziaływań na cząstkę o określonej bezwładności i wymiarach początkowych.

Podobne zjawisko zachodzi po przekroczeniu minimum zużycia energii, w tym przypadku występuje istotne zwiększenie liczby oddziaływań na rozdrabniany materiał w stosunku do teoretycznie wymaganych n [55].

Wybrane charakterystyki rozdrabniania, dla potrzeb modelu merytorycznego, można opisać liniową funkcją regresji o postaci:

- dla momentu obrotowego oporów rozdrabniania

$$M_r = -11,111 \cdot \Delta v + 76,923, \quad \text{dla } R = -0,8611 \quad (54)$$

- dla wydajności masowej procesu

$$W = 23,822 \cdot \Delta v + 62,66, \quad \text{dla } R = 0,8334 \quad (55)$$

- dla zapotrzebowania mocy

$$N_r = 0,167 \cdot \Delta v + 0,732, \quad \text{dla } R = 0,7988 \quad (56)$$

- dla jednostkowego zużycia energii

$$E_{RA} = -5,472 \cdot \Delta v + 58,656, \quad \text{dla } R = -0,6767 \quad (57)$$

w zakresie zmienności czynników badanych rozdrabniacza wielotarczowego i układu napędowego z silnikiem o mocy 1,5 kW, bezstopniową przekładnią impulsową oraz prędkością względną krawędzi rozdrabniających średnio od 0,50 m/s do 5,20 m/s.

Dla ustalonych warunków materiałowych, konstrukcyjnych i rozdrabniania (według tabel 4, 5 i 6) można przyjąć, że złożony układ techniczny z silnikiem o mocy maksymalnej 1,5 kW, z przekładnią cierną typu BPI, z rozdrabniaczem wielotarczowym działającym według zasady quasi-ścianania umożliwia rozdrabnianie ziaren podstawowych zbóż z:

- wydajnościami dla:

pszenżyta	67,534 kg/h	98,9 %
pszenicy	68,225 kg/h	100,0 %
żyta	66,842 kg/h	97,9 %
owsa	65,443 kg/h	95,9 %
jęczmienia	66,857 kg/h	97,9 %

- jednostkowym zużyciem energii na rozdrabnianie:

pszenżyta	53,50 kJ/kg	104,5 %
pszenicy	51,20 kJ/kg	100,0 %
żyta	54,30 kJ/kg	106,0 %
owsa	76,47 kJ/kg	149,0 %
jęczmienia	59,11 kJ/kg	115,0 %

Podane wartości są średnimi z zakresu badawczego i w przypadku wydajności są nieistotnie różne dla rozdrabniania wszystkich nasion podstawowych zbóż. Natomiast w przypadku jednostkowego zużycia energii istotne zwiększenie wartości następuje dla owsa i jęczmienia, jako skutek wzrostu zapotrzebowania mocy na pokonanie oporów skrawania. Są to jednak przyrosty (względem pszenicy) prawie o 100 % niższe niż w warunkach modelu fizycznego rozdrabniacza (podrozdział 5.2).

Istotność różnic w zużyciu jednostkowym energii na rozdrabnianie, w warunkach modelowych i maszynowych, jako miara poprawności zastosowania modelu, ma się tak jak 1 : 22 - dla pszenicy i jak 1 : 15 - dla owsa. Prawdopodobną przyczyną takiego stanu relacji są różne warunki zadawania ob-

ciążeń i przepływu mas w rozdrabniaczu i modelu. Materiał w rozdrabniaczu, po rozdrobnieniu na krawędziach, poddawany jest na drodze wyjścia z przesłoni między tarczami dodatkowym oddziaływaniom. Realizowane jest wtórne rozdrabnianie między płytami przez ściskanie i skręcanie cząstek.

Zgodnie z istotą metody badawczej, poszukiwana jest zależność pomiędzy zmiennymi: właściwościami ziaren, cechami konstrukcyjnymi zespołu rozdrabniającego i parametrami rozdrabniania, a jakością rozdrabniania. Wnioskowanie na podstawie przebiegów charakterystyk rozdrabniania jest więc konieczne, jako etap pośredni w analizie wyników, ale niewystarczający ze względu na podwyższanie wartości paszowej śrutki jako celu rozdrabniania.

5.5. Wyniki badań nad energetyką rozdrabniania

Wybrane wyniki analizy statystycznej pracy i wartości paszowej produktu rozdrabniania ziaren zbóż podano na przykładzie tabeli 10 dla quasi-ścianania. Również interpretacje graficzne wartości pokarmowej produktu i pracy przy rozdrabnianiu (rysunki 27, 28 i 29) podano dla pszenżyta. Podane wartości siły rozdrabniającej w postaci wskaźnikowej (tabela 10) są udziałami procentowymi w $P_{r \max}$.

Poza obszarem nieliniowych i nieciągłych zmian zależności opisujących przyrost wartości biologicznej produktu rozdrabniania E_{bio} - wyznaczonej w oparciu o relacje wymiarowe cząstek (rys.27), na początku modelowego rozdrabniania i po przekroczeniu krytycznej siły dla ściskania można stwierdzić, że praca rozdrabniania jest wprost proporcjonalna do przyrostu wartości paszowej uzyskanego produktu rozdrabniania, a ogólna zależność opisująca to zjawisko ma postać:

$$E_{T\lambda} = f(\Delta E_{bio}) \quad (58)$$

gdzie:

$E_{T\lambda}$ - energia zużyta na realizację rozdrabniania w warunkach modelowych (według podrozdziału 5.2),

ΔE_{bio} - przyrosty wartości żywieniowej pasz w wyniku przyrostu powierzchni właściwej lub zmniejszenia się wymiarów cząstek (według zależności (15)).

Jako logiczna konsekwencja rozdrabniania, to właśnie przyrosty energii wyzwolonej w procesie żywienia (dzięki rozdrabnianiu), są zmienną wyznikową i celem rozdrabniania ziarna na paszę. Dla podanego na rysunku 27 przykładu zmian wartości paszowej produktu i energii rozdrabniania można opisać:

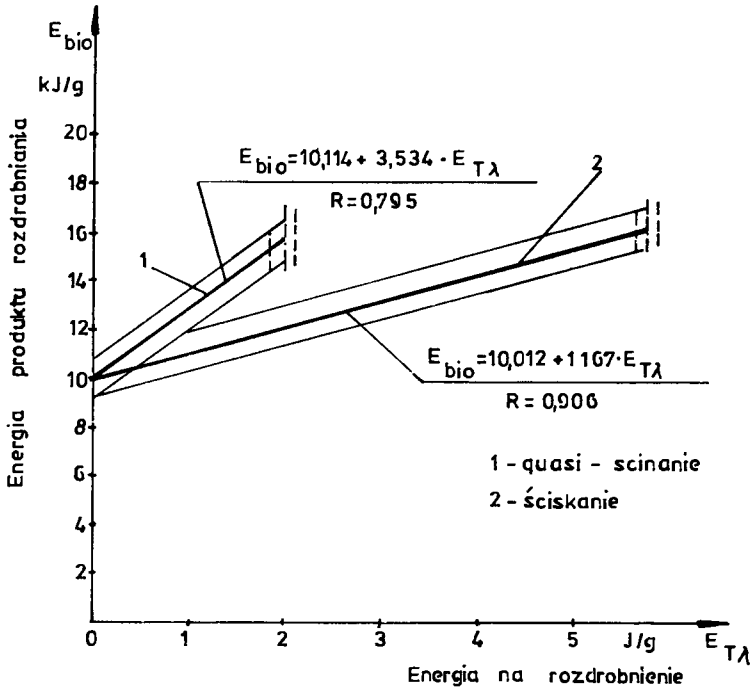
- model rozdrabniania przez quasi-ściananie

$$E_{bio} = 10,114 + 3,534 E_{T\lambda}, \quad \text{dla } R = 0,795 \quad (59)$$

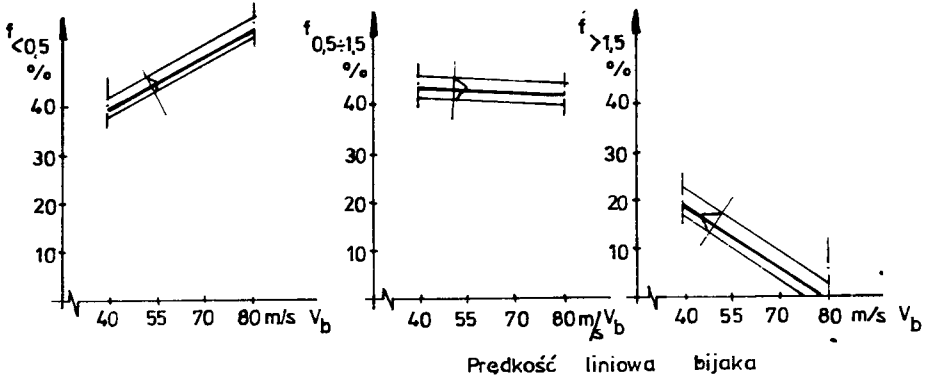
- model rozdrabniania przez ściskanie

$$E_{bio} = 10,012 + 1,167 E_{T\lambda}, \quad \text{dla } R = 0,906 \quad (60)$$

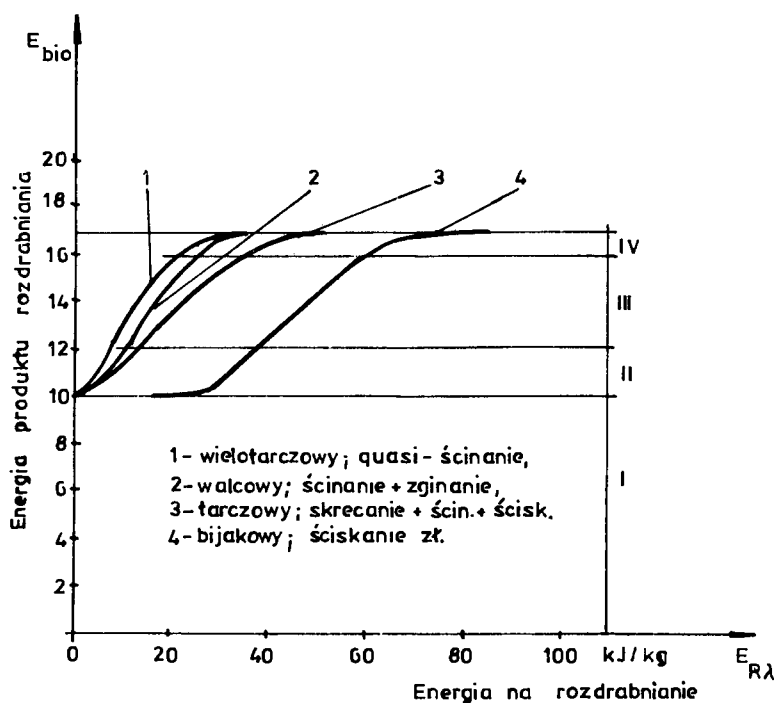
przypadku, dla nierejestrowanych przyrostów powierzchni w ściskanych ziarnach, występują istotne przyrosty strawności obliczeniowej (rys.27). Potwierdzono również znaną wadę teorii Rittingera, że nie uwzględnia ona wpływu technicznego sposobu uzyskania opisywanego efektu, w tym przypadku zmian strawności różnych cząstek wymiarowych uzyskiwanych zmiennymi technikami (rys.29).



Rys.27. Zmiany wartości biologicznej produktu rozdrabniania in vitro w zależności od sposobu rozdrabniania i jednostkowego zużycia energii na rozdrabnianie pszenżyta w warunkach modelowych



Rys.28. Zmiany udziałów frakcyjnych cząstek o charakterystycznych wymiarach przy rozdrabnianiu pszenżyta Largo ze zmienną prędkością obwodową bijaka (dane ilustrujące - o znaczeniu porównawczym dla powszechnie spotykanych rozdrabniaczy bijakowych - badania własne [36])



Rys.29. Zmiany strawności produktu rozdrabniania maszynowego w zależności od jednostkowego zużycia energii i sposobu rozdrabniania: I - strawność ziaren bez obróbki, II - zakres powolnego przyrostu strawności, III - dynamiczny przyrost strawności, IV - zakres zmniejszonego przyrostu strawności. Pszenżyto Largo, zmiany jednostkowego zużycia energii w wyniku sterowania wielkością cząstek i prędkością rozdrabniania (zestawienie wykonano na podstawie wyników badań własnych [36, 53])

Nieuzasadnione są natomiast próby wykorzystywania teorii powierzchniowej, a nawet objętościowej do obliczeń elementów konstrukcyjnych. Nie ma, poza idealizowanymi przypadkami (np. rys.29, krzywa 4), ściśle proporcjonalnej zależności między pracą rozdrabniania, a przyrostem energii strawnej. Występuje jednak możliwość prowadzenia analizy regresji dla liniowej postaci wspomnianej zależności, pod warunkiem akceptacji szerokiego przedziału ufności, nawet dla dużej liczby pomiarów i wysokiej klasy dokładności (rys.27, krzywe 1 i 2).

Przykład:

Na rysunku 28 podano przebiegi zmienności wymiarowej cząstek, tj. mniejszych od 0,50 mm, większych od 1,50 mm i zawartych między tymi wymiarami, dla rozdrabniacza bijakowego, pszenżyta i zmiennej prędkości obwodowej bijaków. Znając współczynniki strawności suchej masy, dla cząstek o podanych wymiarach i udziałach, obliczono wskaźnik wartości biologicznej produktu rozdrabniania.

Według zależności (15) i danych z przykładu powstały zbiorcze zestawienia nakładów energetycznych na rozdrabnianie oraz efektów uzyskanych w jego wyniku (rys.29). Na rysunku tym zaznaczono przebiegi dla średnich idealizowanych równaniem prostej. Wartość współczynnika strawności cząstek o określonym wymiarze jest przedziałem wartości z prawdopodobieństwem np. $P=0,95$.

Dla pszenżyta rozdrabnianego na rozdrabniaczu bijakowym wartość paszowa produktu o podanych wymiarach wynosi:

- $f < 0,50$: $0,8011 < \eta_{bio\ 0,50} < 0,8287$,
- $f_{0,50-1,50}$: $0,7443 < \eta_{bio\ 0,5-1,5} < 0,8103$,
- $f > 1,50$: $0,5879 < \eta_{bio\ 1,50} < 0,7224$.

Estymację właściwości produktu rozdrabniania, doboru parametrów procesu i doboru cech konstrukcyjnych wygodnie jest prowadzić dla wartości średnich, które dla pszenżyta wynoszą:

- $\eta_{bio\ 0,50}^* = 0,8149$,
- $\eta_{bio\ 0,5-1,5}^* = 0,7773$,
- $\eta_{bio\ 1,50}^* = 0,6552$.

Dla pozostałych ziaren zbóż zależą od rodzaju ziarna, udziałów cząstek o określonym wymiarze i sposobu rozdrabniania.

5.6. Wyniki badań układu napędowego i ocena energetyczna

Na rysunku 30 zestawiono przykładowe przebiegi sprawności silnika elektrycznego η_G , bezstopniowej przekładni impulsowej η_P , sprawności rozdrabniania η_R i ogólnej energochłonności technicznego układu do rozdrabniania E_{N+R} . Zestawienie danych do wykreślenia zależności podano w tabeli 11, w której zamieszczono ponadto zmienność sprawności ogólnej η_o , wartości paszowej produktu rozdrabniania (według zależności (15)), jednostkowego zużycia energii według (28), wskaźnika energetycznej efektywności rozdrabniania według (14) i przyrostu temperatury produktu w wyniku rozdrabniania rozdrabniaczem wielotarczowym ΔT .

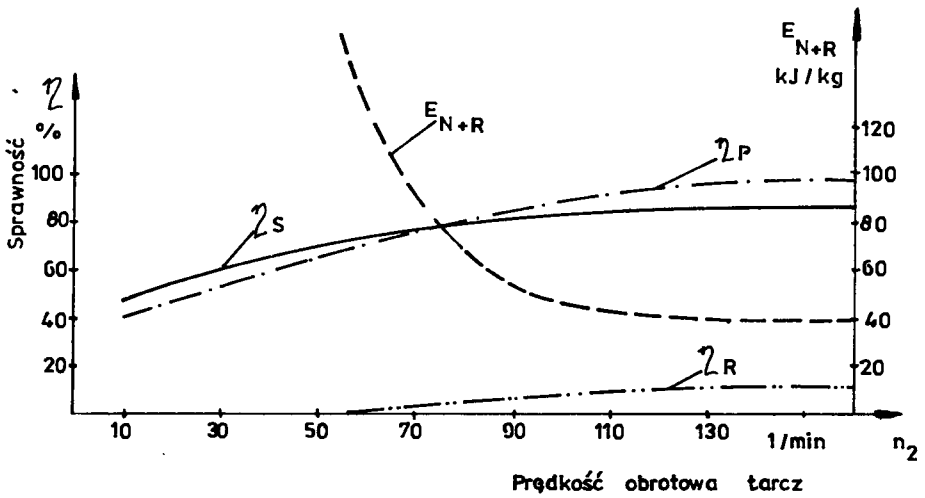
Sprawność silnika elektrycznego zależy od poziomu i charakteru obciążenia. Sprawność poniżej 60 % występuje w początkowej fazie rozdrabniania z małą wydajnością masową - stąd wysoka energochłonność procesu (rys.30 i w tabeli 11 podano wartości od momentu gwałtownego spadku energochłonności, tj. od 6,28 rad/s).

Sprawność przekładni czarnej zależy również od obciążenia. Najniższa wartość sprawności występuje w przedziale prędkości obrotowej od 15 1/min do 50 1/min i zależy od impulsowego charakteru obciążenia rozdrabniającego. Na skutek stabilizacji momentu obrotowego następuje poprawa charakterystyk pracy, ale jednocześnie zaznacza się wpływ momentu na przeregulowanie nastawionego zakresu prędkości kątowej wału wyjściowego przekładni. Zmiana samoczynna prędkości rozdrabniania wywołuje następstwa w postaci zmian charakterystyk rozdrabniania (rysunki 19 i 20, 28 i 30).

Tabela 11

Sprawność elementów układu napędowego rozdrabniacza wielotarczowego
i wartość produktu rozdrabniania, pszenżyto LARGO o $w = 13,1\%$

Prędkość kątowna $\omega_2 = \omega_R$ rad/s	Sprawność					Strawność suchej masy η_{p10} %	Zużycie energii E_c kJ/kg	Wskaźnik energetycznej efektywności e_R	Przyrost temperatury produktu ΔT °C
	silnika η_s %	przekładni η_p %	rozdrab- niania η_R %	ogólna η_o %	6				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
6,28	72,4	56,7	3,06	1,256	74,25	120,50	32,40	6,50	
7,32	74,6	59,1	5,12	2,259	74,33	96,70	40,50	6,50	
8,37	79,2	63,3	6,27	3,145	75,28	72,60	56,06	8,00	
9,42	80,9	77,5	11,44	7,179	75,63	53,50	76,98	6,00	
10,46	81,6	83,6	10,08	6,882	76,16	47,55	88,66	7,00	
11,51	82,0	82,2	9,76	6,584	76,05	44,30	94,67	6,50	
12,56	81,92	83,4	9,53	6,515	76,59	43,70	97,96	7,00	
13,60	83,0	81,8	9,19	6,241	74,38	42,20	93,01	7,50	
14,65	82,4	79,5	8,95	5,865	75,55	41,30	99,60	7,00	
15,70	79,5	80,35	8,88	5,676	74,92	42,00	95,52	9,00	
16,74	81,3	77,2	7,53	4,429	75,27	44,60	91,22	8,00	



Rys.30. Sprawność silnika η_S , przekładni η_P , rozdrabniania η_R i energochłonność układu napędowo-rozdrabniającego E_{N+R} w zależności od prędkości obrotowej wału rozdrabniacza wielotarczowego $n_2 = n_R$

Przykłady podane na rysunku 30 i w tabeli 11 uwiadcniają niebezpieczeństwa wynikające z pomijania wpływu charakterystyk ruchowych przekładni i innych elementów strumienia napędowego w procesie estymacji jakości rozdrabniania. Na przykład sprawność ogólna rozdrabniania 3,145 %, przy prędkości kątowej 8,37 rad/s, jest realizowana dla istotnie różnych składowych od sprawności 4,429 % przy prędkości 16,74 rad/s (tabela 11).

Sprawność przekładni w zależności od pojedynczych cech konstrukcyjnych (podrozdział 3.2) i warunków obciążeń, jako zależność statystyczna, jest opisywana równaniami:

- dla ciernej przekładni impulsowej o zmiennych cechach konstrukcyjnych stosowanej w warunkach rozdrabniania:

$$\eta_P = 1,3324 \cdot 10^{-4} \cdot M_r + 8,7066 \cdot 10^{-1}, \quad \text{dla } R = 0,755 \quad (61)$$

$$\eta_P = -1,8772 \cdot 10^{-4} \cdot \omega_r + 8,9605 \cdot 10^{-1}, \quad \text{dla } R = -0,636 \quad (62)$$

$$\eta_P = -1,1344 \cdot 10^{-3} \cdot C_m + 1,0990, \quad \text{dla } R = -0,581 \quad (63)$$

- dla ciernej przekładni pasowej z pasem zębatym (rys.31) i zmiennego obciążenia siłą rozdrabniającą:

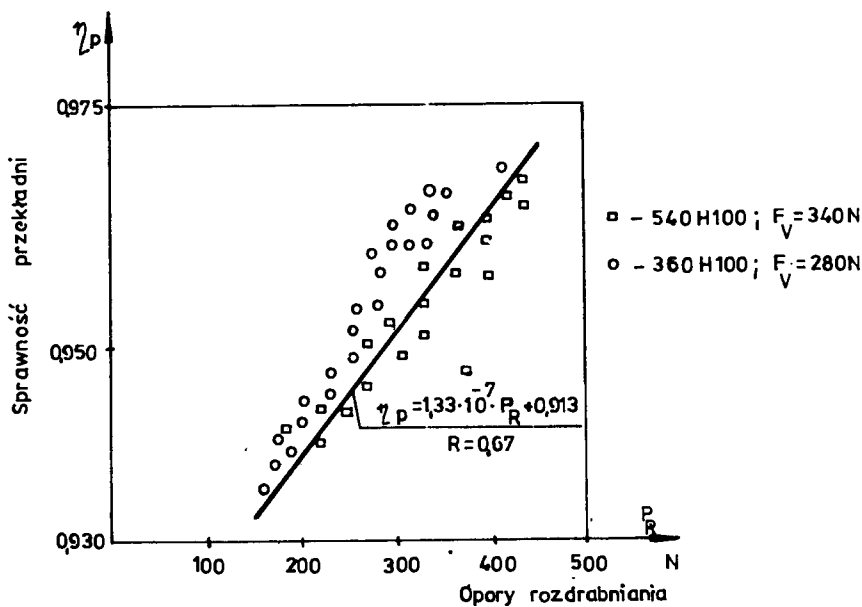
$$\eta_P = 1,3144 \cdot 10^{-7} \cdot P_r + 0,8926, \quad \text{dla } R = 0,542 \quad (64)$$

- dla ciernej przekładni impulsowej i zmiennych średnic otworów w tarczach rozdrabniacza:

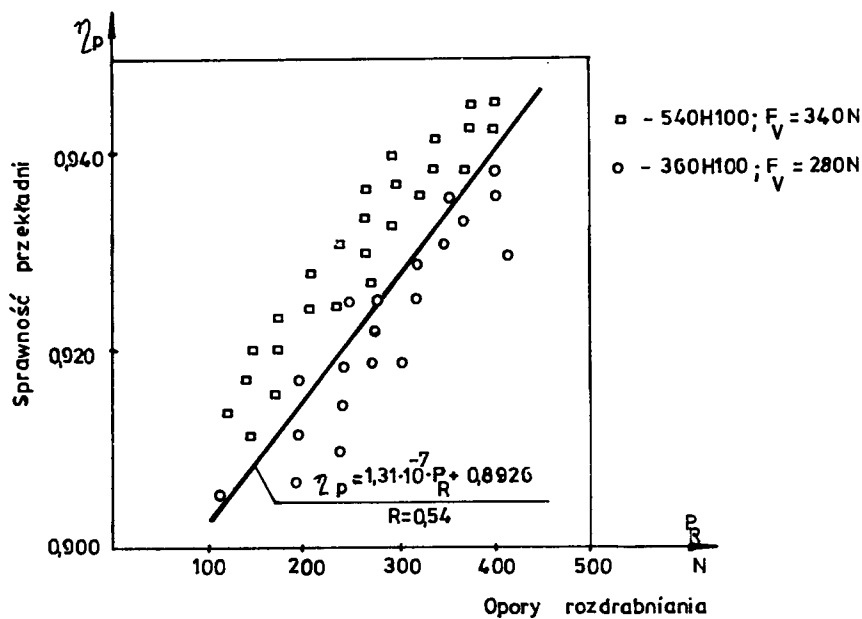
$$\eta_P = -4,777 \cdot 10^{-2} \cdot d_o + 9,0599 \cdot 10^{-1}, \quad \text{dla } R = -0,698 \quad (65)$$

dla warunków według zakresów badawczych.

a)



b)



Rys.31. Sprawność przekładni w zależności od obciążenia siłą rozdrabniającą P_R ; rozdrabniacz wielotarczowy, przekładnia z pasem zębatym: a - $z_1/z_2 = 28/28$, b - $z_1/z_2 = 14/14$, F_V - napięcie wstępne pasa

W wyniku przeprowadzonej analizy regresji wielokrotnej ustalono, że wpływ konstrukcyjnych cech przekładni stosowanej w warunkach rozdrabniacza wielotarczowego można opisać równaniem sprawności średniej o postaci:

$$\begin{aligned} \eta_P = & -0,3468 + 2,5568 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_S + 2,4785 \cdot 10^{-3} \cdot M_r + \\ & + 3,1102 \cdot 10^{-3} \cdot L_t - 1,1109 \cdot 10^{-3} \cdot C_1 - 1,316 \cdot 10^{-3} \cdot C_2 + \\ & - 2,4354 \cdot 10^{-3} \cdot C_3 + 1,9273 \cdot 10^1 \cdot C_g + 1,9312 \cdot 10^{-2} \cdot i_d + \\ & + 4,633 \cdot 10^{-5} \cdot N_S - 6,2357 \cdot 10^{-6} \cdot M_r^2 - 1,4339 \cdot 10^2 \cdot C_g^2 + \\ & - 1,9714 \cdot 10^{-4} \cdot i_d^2, \quad \text{dla } R^2 = 0,941, R = 0,97, \text{ dyspersji} \\ & \text{resztowej } se = 0,05 \end{aligned} \quad (66)$$

gdzie:

- ω_S - prędkość kątowa silnika napędzającego,
- L_t - lepkość kinematyczna czynnika smarnego w przekładni,
- C_1-C_3, C_g - cechy konstrukcyjne mechanizmów impulsowych przekładni,
- i_d - przełożenie dynamiczne przekładni,
- pozostałe oznaczenia jak w rozdziałach 3 i 4.

Równanie (66) umożliwia zastąpienie zmian średniej sprawności przekładni napędzającej rozdrabniacz wielotarczowy zmiennością czynników niezależnych (podaną z prawej strony tego równania) w 94,1%. Nie występuje więc potrzeba uwzględnienia wpływu innych czynników badanych. Można jedynie przeprowadzić postępowanie zmierzające do uproszczenia funkcji obiektu badań. Ma to przede wszystkim znaczenie praktyczne.

6. WYBRANE CECHY KONSTRUKCYJNE WIELOTARCZOWEGO ROZDRABNIACZA ZIAREN ZBÓŻ

Racją istnienia modeli w podstawach rozdrabniania jest wskazywanie kierunków poszukiwań nowych rozwiązań konstrukcyjnych i doskonalenia rozdrabniaczy istniejących w celu realizacji stanów produktu i układów technicznych jeszcze dotąd w takim stopniu lub w takiej postaci nigdy nie u-rzeczywistnianych. Jednocześnie model musi nie tylko ułatwiać odpowiedź, jak osiągać pewne cele, lecz także jakie cele osiągać.

Prezentowana procedura postępowania badawczego jest metodyką badań rozdrabniania w zmiennych warunkach konstrukcyjnych rozdrabniacza i przekładni oraz ruchowych wszystkich elementów strumienia napędowego. Jako taka prowadzi poprzez analizę ilościową wyników do modelu konstrukcyjnego, przedstawiającego analityczny opis badanych zjawisk w postaci formalizmów matematycznych. Składniki modelu konstrukcyjnego mają różny charakter. Model materiału rozdrabnianego kształtowany jest w sposób pośredni, przez przyjęcie ziarna pszenicy jako modelu i w zależności od zjawiska modelowanego odnoszony udziałowo do cechy, która reprezentuje pszenicę. Przeznaczenie paszowe ułatwia kształtowanie modelu energetycznego z uwzględnieniem nakładów i efektów energetycznych w produkcji rozdrabniania. Jako konsekwencja przyjętych dwóch modeli, zostaje identyfikowana konstrukcja rozdrabniacza wielotarczowego przez przyjęcie cech konstrukcyjnych - w obszarze rozwiązania zadania sformułowanego zależnością (39).

Przyjęcie ziarna pszenicy jako pewnego modelu biologicznego dla rozdrabnianych materiałów ziarnistych pozwala na podanie liczbowej zależności między wybranymi charakterystykami dla ziaren podstawowych zbóż. Zestawienie w postaci tabeli 12 wykonano na podstawie danych z badań własnych i rezultatów uzyskanych przez innych badaczy. Dotyczy zużycia energii w warunkach modelowych i maszynowych, masowej wydajności procesów, właściwości wytrzymałościowych oraz wartości paszowej produktu rozdrabniania ziaren zbóż.

W każdym przypadku zużycie energii zależy od rodzaju ziarna. Największy zakres rozpiętości zużycia energii występuje dla ściskania; największą zbieżność wartości obserwuje się dla quasi-ścinnania. Podobne zależności występują w modelowaniu wydajności rozdrabniania poszczególnych ziaren. Model biologicznego materiału nie spełnia warunków postawionych wśród celów rozdrabniania. Występuje potrzeba wykorzystania modelu skutecznościowego, jako podstawowej miary realizacji celu rozdrabniania.

Charakterystyki rozdrabniania ziaren zbóż odniesione do pszenicy

Lp.	Materiał Charakterystyka	Dane liczbowe w %				
		psze- nica	żyto	jęcz- mień	owies	pszen- żyto
1	2	3	4	5	6	7
1	Zużycie energii [110, 111]	100	135	175	325	-
2	Zużycie energii dla ściskania 1/	100	112	136	452	107
3	Zużycie energii dla quasi-ścianiania	100	136	139	234	123
4	Zużycie energii dla rozdrabniacza wielotarcowego	100	106	115	149	104
5	Wydażność dla rozdrabniacza bijakowego 2/	100	98	68	38	103
6	Wydażność dla rozdrabniacza wielotarcowego	100	97	95	91	98
7	Naprężenia dla modelu ściskania	100	142	188	209	135
8	Naprężenia przy quasi-ścianianiu	100	164	164	520	154
9	Ściskanie [20]	100	91	109	59	-
10	Wtłaczanie stempla [20]	100	78	119	26	-
11	Twardość wg Kuprica [20]	100	141	120	43	-
12	Strawność suchej masy po quasi-ścianianiu	100	96	99	88	101

1/ warunki wg programu badań,

2/ $v_b = 80$ m/s, $\phi = 2$ mm.

Ogólna postać modelu energetycznego dla rozdrabniania ziaren zbóż, po uwzględnieniu istniejącej symboliki, jest następująca (wg (14) i (32)):

$$e_R = \frac{(\eta_{bio} - \eta_z) \cdot E_{brutto} \cdot \eta_S \cdot \eta_P}{(k_j \cdot v_r + \tau_q \cdot F_r + \varepsilon \cdot F_r' \cdot v_r^2) \cdot v_r \cdot t \cdot M_k} \quad (67)$$

gdzie:

- E_{brutto}, M_k - według zależności (14),
- η_{bio}, η_z - według zależności (15),
- τ_q - według wyników badań, podrozdział 5.3,
- η_S, η_P - według wyników badań, podrozdział 5.6,
- v_r - według zakresu badawczego (0,60 m/s do 5,20 m/s),
- k_j - współczynnik oporów ruchu dla układu z silnikiem o mocy 1,5 kW i pozostałymi elementami strumienia ruch jak w badaniach; $k_j = 3,2286 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,
- ε - współczynnik proporcjonalności; dla badanego zakresu zmienności czynników $\varepsilon = 8,98 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$,
- F_r' - powierzchnia wtórnych oddziaływań rozdrabniających, w badaniach $F_r' = 0,076 F_r$, $k = 0,076$,

F_r - powierzchnia przekroju rozdrabniania; np. według zależności otrzymanej z badań

$$2F_r = 6,11/\varphi \cdot s_1 \left[(0,043 s_1)^{-1,11 D_{oi} + 1,18} \right] \cdot v_r \cdot e^{1,88 n^2} \quad (68)$$

dla $n = 0,75 - 1,00$ w zależności od rodzaju rozdrabnianych ziaren, s_1 - szczeliny z zakresu badawczego $0,80 - 2,40$ mm; lub jako pole rozdrabniania między łukami otworów (rys.15) wyznaczane na podstawie pliku programów „MODEL QUASI ŚCINANIA”.

W przykładzie konstrukcyjnym pole przekroju wyznaczano na podstawie zależności powierzchniowych, dla:

$$\begin{aligned} a_1 &= r_1 \cdot \cos \alpha_1; & b_1 &= r_1 \cdot \sin \alpha_1, \\ a_2 &= r_2 \cdot \cos \alpha_2; & b_2 &= r_2 \cdot \sin \alpha_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_r &= r_2 \cdot \sin \alpha_2 \int_{x_1}^{x_2} dx + \int_{x_1}^{x_2} \left\{ \left[R^2 - (x - r_2 \cdot \cos \alpha_2)^2 \right]^{1/2} \right\} dx + \\ &- r_1 \cdot \sin \alpha_1 \int_{x_1}^{x_2} dx + \int_{x_1}^{x_2} \left\{ \left[R^2 - (x - r_1 \cdot \cos \alpha_1)^2 \right]^{1/2} \right\} dx \end{aligned} \quad (69)$$

a po podstawieniu $\alpha_1 = \omega_1 \cdot t$ i $\alpha_2 = \omega_2 \cdot t$

$$\begin{aligned} F_r &= r_2 \cdot \sin \omega_2 \cdot t \int_{x_1}^{x_2} dx + \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\left[R^2 - (x - r_2 \cdot \cos \omega_2 \cdot t)^2 \right]} dx + \\ &- r_1 \cdot \sin \omega_1 \cdot t \int_{x_1}^{x_2} dx + \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\left[R^2 - (x - r_1 \cdot \cos \omega_1 \cdot t)^2 \right]} dx \end{aligned} \quad (70)$$

Wstawiając w miejsce podanych wymiarów odpowiednie wartości cech konstrukcyjnych przeprowadzono symulację konstrukcji w zakresie pola przekroju skrawania i przekroju przepływu materiału dla zmiennej liczby tarcz, otworów w tarczy i rzędów otworów. Przykładowe wyniki symulacji powierzchni skrawania i oporów rozdrabniania podano na przykładzie tabeli 13.

Istnieje możliwość wprowadzenia wszystkich danych identyfikujących badany układ techniczny jako elementów procedur symulacyjnych do wyżej podanego pliku i adaptacyjnego dostrajania konstrukcji do $e_R \Rightarrow \max$.

Aktualnie procesu estymacji modelu według zależności (42) nie można sprowadzić poniżej 18 % - ze względu na losowość właściwości materiału biologicznego oraz zmienność charakterystyk ruchowych w czasie (rysunki 32 i 33). Pomimo wysokiej dokładności komputerowych technik pomiarowych obję-

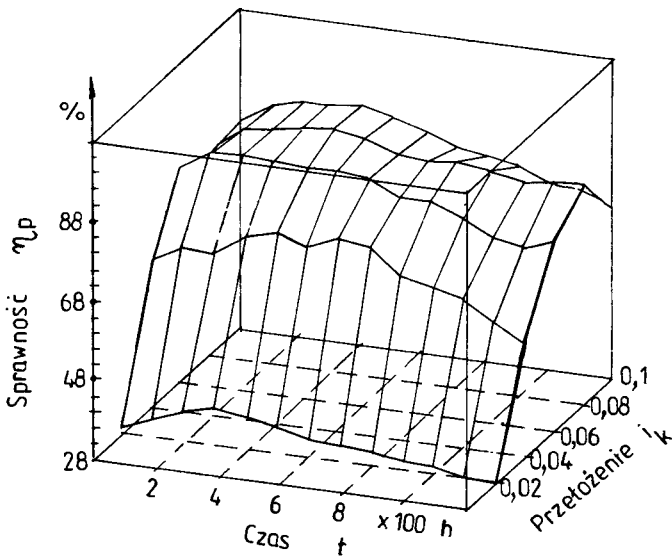
cie uniwersalnym modelem dużej liczby czynników zmiennych powoduje, że wartości liczbowe opisujące przedziały dla zmiennych są istotnie różne. W związku z tym ani dostrajanie modelu, ani stosowanie metod wykorzystujących jawne zależności, czy też statystyczne teorie estymacji, nie dają minimalizacyjnego efektu.

Tabela 13

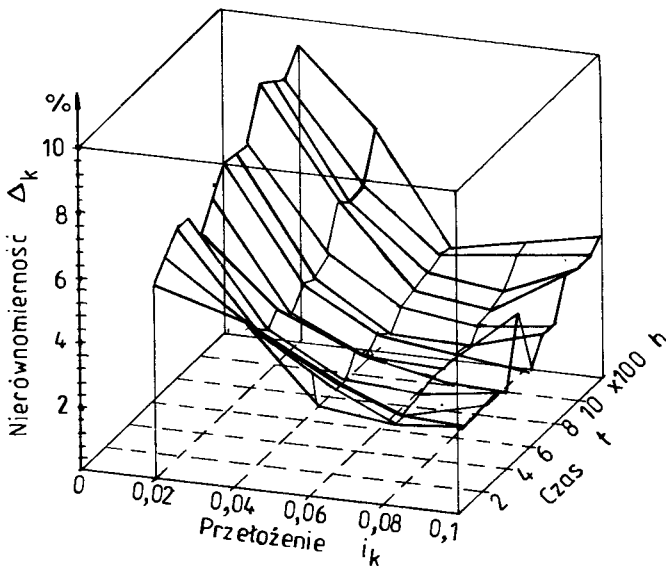
Powierzchnie i siły przy rozdrabnianiu wielotarczowym ziaren zbóż - model symulacyjny; (pz) - pszenżyto, (p) - pszenica, (z) - żyto, (o) - owies, (j) - jęczmień

t	F	Pr(pz)	Pr(p)	Pr(z)	Pr(o)	Pr(j)
s	m ²	N	N	N	N	N
0.0000	0.0004125	59.15	38.27	62.91	198.06	52.73
0.0005	0.0004590	65.78	42.54	69.97	220.36	69.77
0.0010	0.0004586	65.73	42.51	69.91	220.18	69.71
0.0015	0.0004112	58.97	38.15	62.71	197.44	62.53
0.0020	0.0004596	65.87	42.60	70.06	220.65	69.86
0.0025	0.0004607	66.02	42.69	70.21	221.14	70.01
0.0030	0.0004596	65.86	42.59	70.05	220.61	69.85
0.0035	0.0004111	58.95	38.14	62.69	197.39	62.52
0.0040	0.0004585	65.71	42.49	69.88	220.10	69.68
0.0045	0.0004595	65.85	42.59	70.04	220.59	69.84
0.0050	0.0004612	66.10	42.75	70.30	221.41	70.10
0.0055	0.0004118	59.05	38.20	62.80	197.72	62.62
0.0060	0.0004582	65.66	42.47	69.84	219.96	69.64
0.0065	0.0004583	65.68	42.48	69.86	220.01	69.66
0.0070	0.0004607	66.02	42.70	70.22	221.17	70.02
0.0075	0.0004620	66.20	42.81	70.41	221.77	70.21
0.0080	0.0004587	65.73	42.51	69.91	220.19	69.71
0.0085	0.0004580	65.63	42.45	69.80	219.85	69.61
0.0090	0.0004595	65.85	42.59	70.04	220.58	69.84
0.0095	0.0004617	66.17	42.79	70.37	221.65	70.18
0.0100	0.0004600	65.92	42.63	70.11	220.83	69.91

Fmin= 0.0004111
Fmax= 0.0004620



Rys.32. Zmiany średniej sprawności przekładni BPI w zależności od realizowanego przełożenia kinematycznego i czasu użytkowania

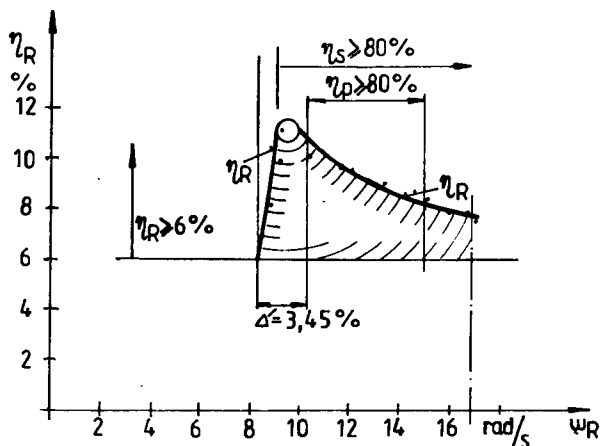


Rys.33. Zmiany przebiegów nierównomierności kinematycznej przekładni BPI w zależności od realizowanego przełożenia kinematycznego i czasu użytkowania

Dla przykładu badawczego konstrukcja rozdrabniacza wielotarczowego, w warunkach opisanych zakresem zmienności, jest rozwiązaniem zadania (39)

w następujących współrzędnych x^x :

- cech konstrukcyjnych zespołu rozdrabniającego tj. $h_{1x} = 10$ mm, $h_{2x} = 8$ mm, $s_{ix} = 1,6$ mm, $d_{ix} = 15,0$ mm, $\gamma_x = 75^\circ$, $t_{ox} = t_{rx} = 25,0$ mm, $R_{ax} = 10$ μ m, $D_{zx} = 180,0$ mm, $D_{ox} = 111,46$ mm,
- charakterystyk ruchowych układu napędowego (rys.34) tj. sprawności silnika $\eta_{Sx} > 0,80$, sprawności przekładni $\eta_{Px} > 0,80$ (w czasie 0-1200 h w ograniczonym zakresie przełożeń kinematycznych i dynamicznych - rys.32), nierównomierności kinematycznej $\Delta_{Kx} = 3,45$ % (w ograniczonym zakresie przełożeń - rys.33), przejściem masy typu S_{1x} i prędkości kątowej wału rozdrabniacza w przedziale $8,22$ rad/s $< \omega_{1x} < 16,88$ rad/s.



Rys.34. Sprawność rozdrabniania ziaren zbóż w zależności od prędkości kątowej pakietu tarcz, w warunkach η_{Sx} , η_{Px} , Δ_{Kx} ; przekładnia BPI, silnik elektryczny o mocy 1,5 kW, rozdrabniacz wielotarczowy, pszenżyto Largo o $w = 12,9$ %

W procesie doboru cech konstrukcyjnych rozdrabniaczy nasion istotną rolę odgrywają badania procesu maszynowego, konstrukcji i modelu maszyny, a przede wszystkim materiału z uwzględnieniem specyfiki zespołu rozdrabniającego oraz złożonych relacji w układzie technicznym.

7. WNIOSKI

Wyniki badań i rozważań w zakresie sprawności i skuteczności rozdrabniania ziaren zbóż z wykorzystaniem techniki quasi-ścínania technologicznego upoważniają do wyciągnięcia następujących wniosków i ustaleń końcowych:

1. Usystematyzowane, istniejące podstawy rozdrabniania umożliwiają przeprowadzenie analizy charakterystyk jakościowych, powrót do miejsca, od którego rozpoczęło się zaspokajanie potrzeby rozdrabniania (poprzez studium zmiennych opisujących) oraz zaprojektowanie metody doboru cech konstrukcyjnych rozdrabniaczy ziaren zboża, uwzględniającej funkcję celu rozdrabniania materiału biologicznego.

2. Projektowanie metodyki doboru cech konstrukcyjnych elementów roboczych rozdrabniacza, na obecnym etapie rozwoju wiedzy i techniki, musi opierać się na wynikach eksperymentu czynnego, uwzględniającego decydujący o rozdrabnianiu wpływ ruchu i jego charakterystyk na pracę układu funkcjonalno-napędowego.

3. Obserwowany stan zużycia energii, podczas rozdrabniania nasion według zasady quasi-ścínania technologicznego, w warunkach modelu fizycznego, zależy od powierzchni i siły rozdrabniania, przy czym poziom na uzyskanie zadanej wartości paszowej śruty jest istotnie niższy niż w przypadku modelu rozdrabniacza bijakowego i tarczowego, a porównywalny z walcowym (podrozdział 5.5 i [53]).

4. Zużycie energii podczas rozdrabniania maszynowego, według zasady quasi-ścínania, zależy od poziomu odwzorowania warunków modelowych, charakterystyki sprawnościowej silnika, przekładni i stanu cech konstrukcyjnych elementów uczestniczących w rozdrabnianiu oraz zmienności charakterystyk ruchowych układu technicznego w czasie użytkowania.

5. Stan wielkości związanych i wywołanych techniką rozdrabniania ziaren podstawowych zbóż w warunkach modelowych i maszynowych można opisać zależnością matematyczną, definiowaną jako energetyczny model rozdrabniania ziarna na paszę (zależność (14)), która jest jednocześnie liczbową wartością funkcji celu rozdrabniania.

6. W modelu matematycznym można uwzględnić zależności opisujące zmienność: cech konstrukcyjnych rozdrabniacza (według zależności w podrozdziałach 5.2, 5.3 i 5.4), cech konstrukcyjnych i charakterystyk ruchowych przekładni (według zależności w podrozdziale 5.6), a przede wszystkim zmienność realizacji składowych funkcji celu, czyli przyrostu energii strawnej w wyniku rozdrabniania ziarna, np. według zależności (15).

7. Główną przyczyną obniżenia zużycia energii na rozdrabnianie, nawet do kilkunastu razy w stosunku do przyrostu wartości energii strawnej (tabela 11) jest zaprojektowanie procesu rozdrabniania wykorzystującego, między innymi, podatność ziaren zbóż na ścinanie z jednoczesną możliwością sterowania cechami ruchu i konstrukcji krawędzi rozdrabniającej.

8. Uwzględnienie w modelu matematycznym istotnej dla celów praktycznych liczby cech konstrukcyjnych elementów rozdrabniacza, przekładni, a nawet rozdrabnianego materiału, stwarza podstawy doskonalenia konstrukcji układu technicznego i rozwoju technologii przetwórstwa mechanicznego ziaren, zależność (67).

9. Zaistnienie warunków konstrukcyjnych opisywanych rozwiązaniem x^m (rozdział 6), dla rozdrabniacza wielotarczowego z tarczami o stałym gradientie prędkości kątowej, silnikiem elektrycznym i bezstopniową przekładnią impulsową lub pasową przekładnią zębatą, prowadzi do realizacji procesu rozdrabniania ziaren zbóż ze średnio 98 razy większym przyrostem wyzwolonej energii z produktu od nakładów na jej uzyskanie (tabela 11). Przy czym jest to stan lepszy od rozdrabniania bijakowego, ale uszczegółowienie może nastąpić po dalszych badaniach nad serią produkcyjną rozdrabniaczy wielotarczowych.

10. Z uwagi na to, że badania prowadzono w warunkach przemiennego ruchu tarcz i stabilizowanych właściwości materiału rozdrabnianego, należy je w najbliższej przyszłości poszerzyć o inne możliwości ruchowe, zmienne właściwości materiału, zmienną postać zespołu i inne materiały rozdrabniane.



LITERATURA

- [1] Austin L.B.: Zur Theorie der Zerkleinerung. Aufbereitungstechnik
1/1966
- [2] Austin L.B.: A commentary on the Kick, Bond and Rittinger Laws of
Grinding. Powder Technology 7/1973, s. 315 - 317
- [3] Barabaszkin W.P.: Mołotkowyje i rotornyje drobilki. Nedra, Moskwa 1973
- [4] Bartkowiak A.: Podstawowe algorytmy statystyki matematycznej. PWN,
Warszawa 1979
- [5] Baumgart S.: Zur Vergleich von Zerkleinerungsergebnissen der Einzel-
kornzerkleinerung bei verschiedenen Beanspruchungsarten. Powder Tech-
nology 8/1973, s. 107 - 115
- [6] Bergner E.: Zum Einfluss des Zerkleinerungsprozess auf die Verdulich-
keit von Getreidekornen. Archiv. für Tiernahrung. T.33, 6/1983, s. 2-3
- [7] Bernhardt H.: Zur mechanischen Aktivierung in Feinzerkleinerungs-
maschinen. Dechema-Monogr. 76/1976, s. 213 - 225
- [8] Boss J.: Badania nad energią podczas rozdrabniania ziaren zbóż. Prze-
gląd Zbożowo-Młynarski 6/1986, s. 3 - 7
- [9] Bogusz M., Flizikowski J.: Pomiary szybkozmiennych sygnałów generowa-
nych przez hydrauliczny wzbudnik drgań. Maszyny i Ciągniki Rolnicze
6/1983, s. 15 - 18
- [10] Bródka B.: Rozdrabnianie jako podstawowa czynność technologiczna.
Biul. Inf. Przem. Pasz. 1/1970
- [11] Brandt K.: Anmerkungen zur Beurteilung von Hammermühlen. Die Mühle
15/1970
- [12] Buchar J., Dusek J., Svoboda J.: The behaviour of rocks at stress
wave loading. Dechema-Monogr. 79/1976, s. 115 - 129
- [13] Byszewski W., Haman J.: Gleba, maszyna, roślina. PWN, Warszawa 1977
- [14] Chwiej M.: Aparatura przemysłu spożywczego. Maszyny i aparaty. PWN,
Warszawa 1977
- [15] Chwiej M.: Próba doboru podstawowych wielkości konstrukcyjnych roz-
drabniarki bijakowej w aspekcie wydajności i zużycia energii. Roczniki
Nauk Rolniczych PAN, t. 76, z. 3, PWN, Warszawa 1986
- [16] Cowin S.C.: The Theory of Static Loads in Bins. J. of Appl. Mech.
Trans. ASME 44 3/1977, s. 409 - 412

- [17] Cowin S.C.: Waves of Dilatancy in a Granular Material with Incompressible Granules. J. of Engin. Sci. Vol. 19/1981, s. 993-1008
- [18] Dajniak H.: Ciągniki - teoria ruchu i konstruowania. WKiŁ, Warszawa 1979
- [19] Dietrych J.: System i konstrukcja. WNT, Warszawa 1985
- [20] Dmitrewski J.: Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych. T. 3, PWRiL, Warszawa 1978
- [21] Dorywalski L.: Metodyka oceny nasion. PWRiL, Warszawa 1964
- [22] Dreszer A.: Zagadnienia doświadczalnej weryfikacji modelu ciała rozdrobnionego o wzmocnieniu gęstościowym. Rozpr. Inż. 20/1972, s. 351 - 387
- [23] Dreszer A.: Badania mechanizmów plastycznego płynięcia materiałów ziarnistych. Rozprawa habilitacyjna. IPPT, Warszawa 1975
- [24] Dulcet E.: Badania funkcjonalne prototypu rozdrabniacza bijakowego H-155. BZ-86/81, Prace ATR, Bydgoszcz 1982
- [25] Dziama A.: Metody konstruowania maszyn. PWN, Warszawa 1985
- [26] Energetyczne systemy wartościowania pasz. Materiały z seminarium. 6-7.03.1985, ATR Bydgoszcz
- [27] Erickson J.: Wheat versus corn in pelleted and meal diets. Journal of Animal Science 7/1980
- [28] Flizikowski J., Woliński A.: Sposoby określania prędkości i przyspieszenia kąowego w dynamicznej, bezhamulcowej metodzie diagnostyki silników. Zesz. Nauk. ATR, Mechanika 17, Bydgoszcz 1977, s. 181 - 194
- [29] Flizikowski J.: Badania niezawodności przenośników rolniczych. Zesz. Nauk. ATR, Mechanika 24, Bydgoszcz 1981, s. 33 - 40
- [30] Flizikowski J. i inni: Badania bezstopniowych przekładni impulsowych stosowanych w maszynach rolniczych. Maszyny i Ciągniki Rolnicze 7/1983, s. 7 - 9
- [31] Flizikowski J., Szala J.: Badania wpływu wybranych cech konstrukcyjnych bezstopniowej przekładni impulsowej na charakterystyki ruchowe. XI Sympozjon PKM, PW, Warszawa 1983, s. 72 - 73
- [32] Flizikowski J.: Wpływ cech konstrukcyjnych bezstopniowej przekładni impulsowej na charakterystyki ruchowe. PG, Gdańsk 1983
- [33] Flizikowski J.: Ocena konstrukcji bezstopniowej przekładni impulsowej stosowanej w przetwórstwie pasz. BZ-76/84, Prace ATR, Bydgoszcz 1984
- [34] Flizikowski J.: Badania trwałości bezstopniowych przekładni impulsowych stosowanych w maszynach rolniczych. Cz. I. Zesz. Nauk. ATR, Mechanika 30, Bydgoszcz 1986, s. 5 - 18

- [35] Flizikowski J.: Badania trwałości bezstopniowych przekładni impulsowych stosowanych w maszynach rolniczych. Cz. II. Zesz. Nauk. ATR, Mechanika 30, Bydgoszcz 1986, s. 19 - 32
- [36] Flizikowski J.: Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych układów funkcjonalnych i napędowych na energochłonność rozdrabniania ziaren zbóż. CPBR 10.17. BZ-84/86, Prace ATR, Bydgoszcz 1986
- [37] Flizikowski J.: Wirkungsgrad und Ungleichförmigkeit des Laufes als Kriterium der Beurteilung der Konstruktion von Schaltwerkgetriebe. Verlag VDI, Düsseldorf 1986
- [38] Flizikowski J.: Ein Zahnriemengetriebe. Verlag VDI, Düsseldorf 1986
- [39] Flizikowski J.: Schaltwerkgetriebe in der Plastverarbeitung. Technomer '87, Karl-Marx-Stadt 1987, s. 1 - 10
- [40] Flizikowski J., Bieliński M.: Entwurf einer Mehrscheibenmaschine für Plastzerkleinerung. Technomer '87, Karl-Marx-Stadt 1987, s. 11 - 19
- [41] Flizikowski J.: Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych układów funkcjonalnych i napędowych na energochłonność rozdrabniania ziaren zbóż. CPBR 10.17. BZ-235/86, Prace ATR, Bydgoszcz 1987
- [42] Flizikowski J., Bieliński M.: Rozdrabniacz wielotarczowy zwłaszcza do materiałów ziarnistych. Patent PRL P-140486, UP, Warszawa 1988
- [43] Flizikowski J., Bieliński M.: Rozdrabniacz zwłaszcza do materiałów ziarnistych. Patent PRL P-144566, UP, Warszawa 1988
- [44] Flizikowski J.: Identyfikacja cech konstrukcyjnych bezstopniowej przekładni impulsowej stosowanej w rozdrabniaczach. XIII Sympozjon PKM, P.Sz., Szczecin 1987, s. 104 - 106
- [45] Flizikowski J.: Badania konstrukcyjne rozdrabniaczy. Szkoła Letnia, AR, Lublin 1987
- [46] Flizikowski J.: Sprawność rozdrabniania. Postępy Nauk Rolniczych (w druku)
- [47] Flizikowski J.: Technika identyfikacji wskaźników rozdrabniania. Postępy Nauk Rolniczych (w druku)
- [48] Flizikowski J., Dirska R., Jurkiewicz A.: Technika pomiaru charakterystyk układów napędowych maszyn rozdrabniających. III K.K. Przetw. Sygn. w Telekomunikacji, ATR, Bydgoszcz 1988, s. 195 - 203
- [49] Flizikowski J., Bieliński M.: Rozdrabniacz do materiałów ziarnistych. Postępy Nauk Rolniczych (w druku)
- [50] Flizikowski J.: Modell der Widerstandscharakteristiken der Mehrscheibenschneidmühle. Landtechnik 47 IFT, Köln 1989, s. 99 - 104
- [51] Flizikowski J.: Badania przekładni impulsowej. Polimery 7-8/1988, s. 291 - 294

- [52] Flizikowski J., Rak J.: Tendencje rozwoju konstrukcji przekładni z pasem zębatym w przemyśle motoryzacyjnym. Motoryzacja 7-8/1988, s. 164 - 167
- [53] Flizikowski J., Mikołajczak J., Podkówka W.: Sprawność procesu i strawność produktu rozdrabniania. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C (w druku)
- [54] Flizikowski J.: Wskaźnik energetycznej efektywności rozdrabniania ziaren zbóż. IV Sympozjum Kanafojskiego, Płock 1988, s. 166 - 169
- [55] Flizikowski J., Bieliński M., Rak J.: Konstruktion und Entwicklungstendenzen einer Mehrscheibenschneidmühle. Z. u. K. Akademie Nauk NRD, Freiberg 1988, s. 63 - 70
- [56] Flizikowski J., Bieliński M.: Wahl der Zerkleinerungsmethode in Abhängigkeit von PE-regenerateigenschaften. Z. u. K. Akademie Nauk NRD, Freiberg 1988, s. 161 - 166
- [57] Flizikowski J.; Rak J.: Synchronriemengetriebe als energiesparende Antriebe in Zerkleinerungsmaschinen. Z. u. K. Akademie Nauk NRD, Freiberg 1988, s. 167 - 172
- [58] Fąfara R.: Biologiczne skutki mechanizacji i konserwacji ziaren zbóż. Materiały V Wydziału PAN dotyczące prognoz rozwoju nauk rolniczych w Polsce. Warszawa 1985
- [59] Fiala J., Jelinek A.: Fizykalni własnosti zemedelskich materiali. Zem. Technika, t. 17, z. 5, 1971
- [60] Friedrich W.: Factors Affecting the Particle Reduction Process in Hammermills. Die Mühle, z. 48, s. 648; z. 49, s. 660; 1959
- [61] Friedrich W.: Wpływ własności fizycznych surowców na procesy technologiczne zachodzące przy sporządzaniu mieszanki paszowej. Biul. Inf. Przem. Pasz. 1/1971, s. 92
- [62] Gajdowicz M.: Porównanie sprawności ogólnej pojazdu. Archiwum Budowy Maszyn, t. 33, z. 3, PAN, Warszawa 1986, s. 294 - 309
- [63] Gąska R., Kolowca J., Slipek Z.: Próba statystycznego opisu empirycznych rozkładów cech mechanicznych pszenicy. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C, t. 73, z. 4, 1978
- [64] Gąska R., Kolowca J., Slipek Z.: Wpływ obciążeń mechanicznych na wartość biologiczną ziarna pszenicy. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C, t. 73, z. 4, 1978
- [65] Gąska R., Kolowca J.: Wpływ stopnia uwilgocenia ziarna na powstawanie mechanicznych uszkodzeń. Zesz. Probl. Nauk Roln. 202/1978
- [66] Gehrke B.: Übertragungsgleichungen für die Zerkleinerungskenngrößen bei der Vermahlung von Mais in Siebhammermühlen verschiedener Grösse. T.U. Braunschweig 1971

- [67] Gehrke B.: Untersuchungen an einer Siebprallmühle mit Schlagleistenrotor. Sonderdruck aus Aufbereit.-Tech. Roczn. 12/1971, z. 4, s.194-202
- [68] Giergiel J., Uhl T.: Podstawowe problemy identyfikacji układów mechanicznych. Zesz. Nauk. Pol. Rz., Mechanika 11, Rzeszów 1986
- [69] Giergiel J.: Metoda identyfikacji układów mechanicznych przy wymuszeniu uderzeniowym. Archiwum Budowy Maszyn, t. 33, z. 3, PAN, Warszawa 1986, s. 321 - 337
- [70] Geldemeister H.H.: Bruchphenomene und Spannungsfeld in prallbeanspruchten Kugeln. Dechema-Monogr. 79/1976, s. 131 - 149
- [71] Glebow L.: Skorost udara pełnowo izmielenia ziarna pri proizvodstwie kombikormow. Mukomolno- Elew. i Kombikor. Prom. 8/1979
- [72] Golec S., Kwiatkowski M.: Badania nad wpływem wilgotności surowców zbożowych na wydajność i energochłonność procesu rozdrabniania. Biul. Inf. Przem. Pasz. 1-2/1982
- [73] Golec S., Kwiatkowski M., Zawiślak K.: Wpływ dwustopniowego rozdrabniania na energochłonność procesu i jakość otrzymanych śrut. Biul. Inf. Przem. Pasz. 1/1983, s. 28 - 38
- [74] Greń J.: Statystyka matematyczna, modele i zadania. PWN, Warszawa 1982
- [75] Grochowicz J.: Niektóre zagadnienia odporności nasion na uszkodzenia mechaniczne. Zesz. Probl. Nauk.Roln. 112/1971
- [76] Grochowicz J., Laskowski J.: Analiza czynników wpływających na parametry pracy rozdrabniaczy bijakowych. Biul. Inf. Przem. Pasz. 1/1979, s. 4
- [77] Grochowicz J.: Wpływ niektórych czynników na proces rozdrabniania surowców rozdrabniaczami bijakowymi. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 225/1980, s. 209 - 217
- [78] Grochowicz J.: Badania zmian niektórych fizycznych cech mieszanek paszowych w wyniku ich rozdrabniania młynkiem młotkowym. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C, t. 75, z. 2. 1980
- [79] Grochowicz J.: Technologia produkcji mieszanek paszowych. PWRiL, Warszawa 1985
- [80] Grundas S.: Próba określenia związku pomiędzy obciążeniem statycznym a porowatością ziarna pszenicy. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C, t. 73, z. 4. 1978
- [81] Haman J., Zdanowicz A.: O potrzebie rozszerzania studiów nad reologią materiałów w rolnictwie. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C, t. 68, z. 2, 1968
- [82] Hanzelik F.: Poznakomy u deformaciji rostlin pri zatageni. Polnohospodarstvo Vsak Bratislava 8/1968
- [83] Hanzelik F.: Energia na deformaciji i zarn jecmana pri dynamicckom a staticckom zatageni. Zem. Technika 8/1979

- [84] Huizing J.A.: Korrelhardheidsmetr. Jearverslag, Wageningen 1969
- [85] Iracki L.: Rozwiązania technologiczne w wytwórniach pasz na świecie. Przegląd Zbożowo-Młynarski 3-4/1986
- [86] Jankowski S.: Zarys technologii zbóż i strączkowych jadalnych. PWN, Warszawa 1967
- [87] Jankowski S.: Wzajemne ustawienie rowków par walców. Przegląd Zbożowo-Młynarski 7-8/1985
- [88] Jankowski S.: Zarys technologii młynarstwa i paszarstwa. WNT, Warszawa 1981
- [89] Jindal V.K., Austin L.G.: The Kinetics of Hammer Milling of Maize. Powder Technology 14/1976, s. 35 - 39
- [90] Jurga R.: Przemiał pszenicy obecnie i kierunki postępu technologicznego. Przegląd Zbożowo-Młynarski 5/1986, s. 22
- [91] Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa: Sprawozdania z badań kwalifikacyjnych rozdrabniaczy za lata 1975 - 1987
- [92] Jurga R., Kowalewski W.: Propozycje udoskonalenia konstrukcji maszyn i urządzeń krajowych. Przegląd Zbożowo-Młynarski 4/1985
- [93] Kalwaj J., Ciucias J.: Zmodernizowany rozdrabniacz bijakowy. Przegląd Zbożowo-Młynarski 3/1983, s. 27
- [94] Kalwaj J.: Analiza możliwości zmniejszenia energochłonności rozdrabniacza udarowego ziarna zbóż przez zastosowanie wymuszonego przepływu powietrza. Zesz. Nauk. ATR, Mechanika 24, Bydgoszcz 1981
- [95] Kanafojski Cz., Karwowski T.: Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych. T. 2. PWRiL, Warszawa 1972
- [96] Kerlin H.P.: Zerkleinerung von Kohle als Einzelkorn und von kollektiv. T.U. Braunschweig 1980
- [97] Kikiewicz Z.: Zagadnienia podwyższania niezawodności złożonych obiektów na przykładzie maszyn papierniczych. Zesz. Nauk ATR, Mechanika 24, Bydgoszcz 1981, s. 77 - 89
- [98] Kisielow N.N.: Umiało ispolzowat techniku na uborkie urogaja. Nauka Elew. i Kombikor. Prom. 4/1972
- [99] Klimienko N., Kirpicznikow F.: Isledowania regima roboty mołotkowych drobiłok. Nauka Elew. i Kombikor. Prom. 4/1972
- [100] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczenia. PWN, Warszawa 1985
- [101] Kocańda S., Dietrych J.: Podstawy konstrukcji maszyn. PWN, Warszawa 1971
- [102] Kolowca J.: Badania nad wytrzymałością ziarna zbóż. Zesz. Nauk WSR 14/1977, Kraków

- [103] Kolowca J.: Badania nad wytrzymałością ziarna pszenicy na powstawanie mechanicznych uszkodzeń. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C, t. 71, z. 3, 1974
- [104] Kolowca J., Ptaszek K.: Pomiar wielkości geometrycznych ziarna zbóż. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C, t. 71, z. 2, 1974
- [105] Konieczna M.: Istota uszkodzeń zarodników pszenicy. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C, t. 77, z. 11, 1986
- [106] Konieczna M.: Odształcenia ziarniaków pszenicy w kontrolowanych warunkach dynamicznego obciążenia. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C, t. 77, z. 11, 1986
- [107] Kottel N.: Die Hammermühle einer der Hauptmaschinen in der Kraftfutterindustrie. Die Mühlerei 13/1975
- [108] Koziej J.: Stan mechanizacji produkcji zwierzęcej w gospodarstwach indywidualnych. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C, t. 74, z. 2, 1980
- [109] Koziej J.: Urządzenia techniczne w rolnictwie. PWRiL, Warszawa 1982
- [110] Kwieciński A.: Maszyny do produkcji zwierzęcej. Skrypt AR, Lublin 1975
- [111] Kwieciński A.: Maszyny i urządzenia w produkcji zwierzęcej. PWN, Warszawa 1984
- [112] Leśniewski J.: Metoda oceny stopnia rozdrabniania surowców i mieszanek paszowych. Biul. Inf. Przem. Pasz. 1-2/1982
- [113] Liepe L.: Zur Modellierung der Zerkleinerung in der Hammermühle. Dissertation A, T.U. Dresden 1986
- [114] Linnik J.: Metoda najmniejszych kwadratów i teoria opracowania obserwacji. PWN, Warszawa 1978
- [115] Lipiński M., Słomkowski J.: Badania niektórych właściwości fizycznych brykietów. Przegląd Hodowlany 18/1976, s. 6
- [116] Looman J.: Schaltwerkgetriebe. VDI-Richtlinien 2146 Düsseldorf 1975
- [117] Levinson M.: Displacement and Velocity Fields in Hoppers. Powder Technology 16/1977, s. 29-43
- [118] Mielnikow S. i inni: Mechanizacja ziwodnowodskich fiera. Kołos, Moskwa 1969
- [119] Mohsenin N.N.: Physical Properties of Plant and Animal Materials. Vol. 1. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. Gordon and Breach Science Publishers, New York 1970
- [120] Mikołajczak J.: Badania nad zakiszaniem pasz zielonych z dodatkiem płynnych konserwantów chemicznych. Zesz. Nauk. ATR, Rozprawy nr 13, Bydgoszcz 1986
- [121] Morgan C.A., Campling P.C.: Cyt. Przegląd naukowej literatury zootechnicznej 3/1979

- [122] Mróz Z.: Podstawy teorii plastyczności ośrodków rozdrabnianych. Osolineum, Wrocław 1972
- [123] Mróz Z.: Doskonalenie metod badania parametrów płynięcia materiałów ziarnistych. Prace IPPT nr 54, 1973
- [124] Muszyński H.: Wstęp do metodologii pedagogiki. PWN, Warszawa 1970
- [125] Mościcki L.: Tendencje rozwojowe w konstrukcji rozdrabniaczy bijakowych w przemyśle paszowym. Przemysł Spożywczy 10/1975
- [126] Naumow I.A.: Sowierszenstwowanie kondicionierowania i izmilchenia pszenicy i rgi. Kołos, Moskwa 1975
- [127] Nowak A.: Teoretyczne podstawy rozdrabniania ciał stałych. Prace Nauk.-Bad. Inst. Masz. Spoż., Warszawa 1972
- [128] Nowak A.: Badania wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych rozdrabniającego zespołu bijakowego na efektywność rozdrabniania materiałów ziarnistych. Pol. Pozn., Poznań 1976
- [129] Nowicki W.: Proces pełzania w warunkach jednoosiowego ściskania ziarna pszenicy, żyta i jęczmienia. Przegląd Zbożowo-Młynarski 12/1978
- [130] Ocepek D.: Zerkleinerungstechnik - eine Übersicht. Verfahrenstechnik 10 nr 5/1976, s. 285 - 289
- [131] Orzechowski J.: Mikrouszkodzenia ziarna i jego skutki. Mechanizacja Rolnictwa 13/1969
- [132] Pahl M., Landwehr D.: Abkühlverhalten von Pfeffer bei der Kaltzerkleinerung. ZFL Karlsruhe 8/1987, s. 660 - 673
- [133] Pfost H.B.: Grinding and Rolling. Feed Manufacturing Technology. Amer. Feed Manufac. Ass. Inc. Arlington 1976
- [134] Piłat J.: Wpływ śrutowania i gniecienia na strawność i wartość pokarmową ziarna jęczmienia w żywieniu tuczników. Prace ATR Bydgoszcz WZ 35/1985
- [135] Podkówa W.: Metody intensyfikacji produkcji zwierzęcej w oparciu o regionalną bazę paszową. Sprawozdania Naukowe ATR Bydgoszcz CPBR 10.17/1987-90
- [136] Pol J.: Czyszczenie wstępne i magazynowanie zboża w młynach gospodarczych. Przegląd Zbożowo-Młynarski 1-2/1986
- [137] Pabis S.: Metodologia i metody nauk empirycznych. PWN, Warszawa 1985
- [138] Polański Z.: Współczesne metody badań doświadczalnych. Wiedza Powszechna, Warszawa 1978
- [139] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984
- [140] Pytkowski W.: Organizacja badań i ocena prac naukowych. PWN, Warszawa 1981

- [141] Przedpełski S. i inni: Ocena technologii produkcji przemysłowych mieszanek paszowych rozdrabnianych po zmieszaniu surowców. Biul. Inf. Przem. Pasz. 3-4/1972, s. 57
- [142] Pticin S.: Izmienie kaczestwa siemian pod wozdziejstwem udarnych nagruzok. Wiestnik Sielskochoz. Nauk 7/1967
- [143] Praca zbiorowa: Sprężysto-plastyczne modele ośrodków rozdrobnionych. Ossolineum, Wrocław 1980
- [144] Rak J.: Wirkungsgrad der Zahnriemengetriebe. T.U. Dresden 1983
- [145] Rak J., Flizikowski J.: Technologische Probleme der Zahnriemenherstellung. Technische Rundschau 5/1989, s. 24 - 27
- [146] Rawa T.: Wpływ zmiennych parametrów pracy rozdrabniaczy bijakowych na efektywność rozdrabniania ziarna. AR, Lublin 1980
- [147] Rosznin P.: Statyczeskaja optimalizacja roboczego procesa młotkowej drobiłki. Tech. Sielsk. Choz. 6/1974
- [148] Rumpf H.: Mechanische Verfahrenstechnik. Carl Hanser Verlag, München 1975
- [149] Rumpf H.: Wirtschaftlichkeit und ekonomische Bedeutung des Zerkleiners. Dechema-Monogr. 79/1976, s. 19 - 41
- [150] Richtlinien 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf 1986
- [151] Ruszczyc Z.: Żywienie zwierząt i paszoznawstwo. PWRiL, Warszawa 1988
- [152] Strona J.: Uszkodzenia nasion, przyczyny i zapobieganie. PWRiL, Warszawa 1977
- [153] Szumera Z.: Rozdrabnianie komponentów paszowych. Przegląd Zbożowo-Młynarski 4/1979
- [154] Skrzypiński J.: Mikronizacja. Przegląd Zbożowo-Młynarski 1-2/1986
- [155] Skrzypiński J.: Mechaniczne uszlachetnianie surowców. Przegląd Zbożowo-Młynarski 1-2/1986
- [156] Szot B., Grundas S., Grochowicz J.: Metodyka określenia odporności ziarna zbóż na odkształcenia mechaniczne. Roczniki Nauk Rolniczych Seria C, t. 70, z. 3, 1973
- [157] Szot B.: Metodyczne aspekty oceny cech fizycznych ziarna pszenicy. Roczniki Nauk Rolniczych Seria D, t. 160, 1976
- [158] Szot B., Horabik J.: Zagadnienia mechaniki ośrodków sypkich pochodzenia rolniczego. Problemy Agrofizyki 33/1980
- [159] Teit R.M., Bryant R.G.: Cyt. Przegląd Naukowej Literatury Zootechnicznej 1/1974
- [160] Tim Z.: Optymalizacja parametrów organów roboczych rozdrabniaczy bijakowych do suchych pasz objętościowych. Pol. Pozn., Poznań 1978

- [161] Trojanowski P.: Energochłonność produkcji pasz przemysłowych i warunki poszukiwania rezerw energetycznych. Przegląd Zbożowo-Młynarski 12/1976
- [162] Tylżanowski J.: Badania nad rozdrabnianiem wybranych surowców paszowych w młelniku walcowym i młynku strumieniowo-powietrznym. Biul. Inf. Przem. Pasz. 3/1975, s. 39
- [163] Unruch R.: Rozdrabniacze bijakowe. Prace PIMR Poznań 3/1983
- [164] Uzarowicz L.: Maszyny i urządzenia młyńskie. WSiP, Chorzów 1977
- [165] Wen P.: Measurement of Dynamic Viscoelastic Properties of Corn Horny Endosperm. Journal of Materials 4/1970
- [166] Weit H.: Druckverhalten bei der Einzelkornprallzerkleinerung von Kohle. T.U. Braunschweig 1977
- [167] Wenk N.: Warum nicht Gerstensilage als Futterkomponente. Schweizerische Landwirt. Monatschr. 4/1983
- [168] Woliński A.: System automatycznej rejestracji danych. DTR KMRiP ATR, Bydgoszcz 1985
- [169] Wójcicki Z.: Efekty i efektywność postępu technicznego w rolnictwie. Maszyny i Ciągniki Rolnicze 1/1986
- [170] Zaremba W.: Ekonomika i organizacja mechanizacji rolnictwa. PWRiL, Warszawa 1979
- [171] Ziemia S.: Samowystarczalność żywieniowa a wydajność produkcyjna rolnictwa. Nowe Rolnictwo 1-2/1986
- [172] Zotowa S.: Dynamiczeskije isledowania młotkowej drobiłki. Zamiel. Mech. t. 12 Maszinstrojenie, Moskwa 1969
- [173] Żernicki W.: Metody oceny pasz granulowanych. Biul. Inf. Przem. Pasz. 3/1970, s. 33

Skrypty, katalogi i normy

- [174] AGRIS: Zbiór światowej literatury z zakresu rozdrabniania FAL - RFN, G. Englert 1975 - 1986
- [175] Das Futterbewertungssystem VEB Deutscher Landwirtschafts-Verlag, Berlin 1972
- [176] DLG Futterwerttabelle für Schweine
- [177] DLG Prüfberichte 3309, 3196, 2955, 3419, 3618
- [178] DLG Verlag: Zerkleinerung. Frankfurt am Main 1980
- [179] Katalog SPOMASZ: Maszyny i urządzenia dla przemysłu spożywczego. T.1. Maszyny i urządzenia dla przemysłu zbożowo-paszowego. WEMA, Warszawa 1979

- [180] NAGEMA: Zerkleinerungsmaschinen. Berlin 1987
- [181] PN-67/R-64804: Przetwory zbożowe przeznaczone na śrutę. Śruty zbożowe
- [182] PN-68/R-64798: Pasze. Oznaczanie rozdrabniania
- [183] PN-68/R-74017: Ziarna zbóż. Oznaczanie masy 1000 ziaren
- [184] PN-69/R-74016: Ziarna zbóż. Oznaczanie szkodników i zanieczyszczeń, zaśmiecenia
- [185] PN-71/C-04501: Analiza sitowa. Wytyczne wykonania
- [186] PN-73/R-74007: Ziarno zbóż. Oznaczanie gęstości
- [187] PN-75/R-64769: Pasze. Pobieranie próbek
- [188] PN-75/R-64787: Pasze. Oznaczanie szkodników zbożowo-mącznych i zanieczyszczeń
- [189] PN-76/R-64752: Pasze. Oznaczanie wilgotności
- [190] PN-81/N-01306: Hałas maszyn. Metody pomiaru
- [191] PN-84/R-64798: Pasze. Oznaczanie rozdrabniania
- [192] PN-82/R-74011: Ziarno zbóż. Oznaczanie gęstości
- [193] Szczęsny B. i inni: Typizacja maszyn i urządzeń dla przemysłu paszowego. Cz. I i II. Centralne Laboratorium Przemysłu Paszowego, Lublin 1975
- [194] Podkówka W.: Główne kierunki gospodarki żywnościowej. Materiały KZZiGP, ATR Bydgoszcz 1986
- [195] Ziółcka M., Kuźdowicz J., Kielanowski J.: Tabele składu chemicznego i wartości pokarmowej pasz krajowych. PAN Instytut Fizjologii i Żywienia Zwierząt. PWN, Warszawa 1979



BADANIA I PODSTAWY KONSTRUKCYJNE WIELOTARCZOWYCH ROZDRABNIACZY NASION

Streszczenie

W pracy rozważano zagadnienia podstaw konstrukcyjnych budowy wielotarczowych rozdrabniaczy nasion w oparciu o istniejące i modyfikowane modele rozdrabniania oraz wyniki eksperymentu polegającego na chwilowej identyfikacji wskaźników: konstrukcji maszyny, materiału, procesu i celu rozdrabniania.

Zakres pracy obejmuje badania nad nowym typem rozdrabniacza do materiałów sypkich (nasion), którego parametry ruchowe (prędkość krawędzi rozdrabniającej około 1,0 m/s) wymagały zastosowania specjalnej przekładni. Równocześnie prowadzono dodatkowe badania i testy porównawcze, jak np. badania stanowiskowe parametrów cięcia pojedynczych ziaren (w specjalnym przyrządzie do cięcia od 1 do 15 ziaren), pomiary charakterystyk rozdrabniaczy bijakowych, tarczowych i walcowych - dla celów porównawczych, oraz badania złożonych zależności energetycznych przy rozdrabnianiu pasz.

Sformułowano zbiór wskaźników do oceny jakości konstrukcji rozdrabniaczy ziaren zbóż. Wykorzystując funkcję celu rozdrabniania zaproponowano plan energetycznej procedury weryfikacji: materiału - maszyny - procesu rozdrabniania.

Zaprezentowane metody planowania eksperymentów dla celów identyfikacji zostały ukierunkowane na potrzeby podstaw konstrukcyjnych budowy rozdrabniaczy. Uwzględniono przy tym specyfikę eksperymentów konstrukcyjnych z próbami wytrzymałościowymi dla quasi-ścianiania ziaren, zagadnienia charakterystyk ruchowych układów funkcjonalnych i napędowych oraz energię wewnętrzną rozdrabnianego materiału.

Opracowane podstawy konstrukcyjne budowy rozdrabniaczy wielotarczowych umożliwiają zdefiniowania i wyznaczenie: powierzchni rozdrabniania, naprężeń i pracy przy rozdrabnianiu, oraz charakterystyk ruchowych silnika z przekładnią mechaniczną.

W badaniach wykorzystano oryginalny komputerowy system zbierania, przetwarzania i wizualizacji danych, analizy statystycznej i weryfikacji modeli konstrukcyjnych PSI - AMSTRAD - PC 1512. Opracowano procedurę komputerowego wspomaganie konstrukcji rozdrabniaczy wielotarczowych (typu CAD) pod nazwą MODEL QUASI-ŚCIANIANIA.

RESEARCH AND CONSTRUCTIONAL BASE OF SEEDS' MULTIPLATE SHREDDER

Abstract

This research has been devoted to the problem of constructional base of seeds' multiplate shredders on the basis of already existing and modified milling models as well as on the results of the experiment consisting in temporary identification indicators: construction of the machine, type of material, the aim and the process of milling.

The scope of this research comprises the research on a new type of shredder designed for friable materials (seeds) whose motion parameters (the speed of breaking up edge c. a. 1,0 m/s) required the use of specific gear. Simultaneously, a new and additional research has been carried out and comparative tests done, for example: positional research on single seed cutting parameters (in a special tool designed for milling 1 to 15 seeds), additionally characteristic parameters of the beating, plate and rolling shredders have been done for comparative purposes, whatasmore, research on complex energetic interdependencies during the milling process.

A set of indicators has been formulated in order to estimate the quality of the construction of the shredders which were designed milling the grains. Using the function of the aim of milling a verification plan has been proposed which is as follows: material - machine - milling process.

Herewith presented methods of planning the experiments designed for identifying purposes have been directed for the needs of constructional base of the shredders building. Peculiar character of constructional experiments together with the streangth test for seed's quasi-milling, motion characteristics of functional and power transmission systems, as well as inner energy of the material which is being milled have all been taken into account in this research.

Elaborated constructional frames of building the multiplate shredders enable to define and designate: the surface of the disintegration, stress and work during the disintegration process and motion characteristics of the engine with a mechanical gear.

In this research, an original computer system of recording, converting and visualization of the data, statistical analysis and constructional models' verification PSI-AMSTRAD-PC 1512 have been used. Procedure of computer - aided construction of the multiplate shredders (CAD type) has also been elaborated.

ИСПЫТАНИЯ И КОНСТРУКТОРСКАЯ БАЗА МНОГОДИСКОВЫХ ЗЕРНОДРОБИЛОК

Резюме

В настоящей работе рассматривались вопросы, связанные с конструкторской базой создания многодисковых зернодробилок, опираясь на существующие и модифицированные модели дробления и результаты эксперимента, заключающегося в моментальной идентификации показателей: конструкции машины, материала, процесса и цели дробления.

В пределах настоящей работы нашлись исследования над новой моделью дробилки сыпучих материалов /семян/, динамические параметры которой /скорость дробящего ребра около 1 м/сек/ требовали применения специальной передачи. Одновременно проводились дополнительные испытания и сравнительные тесты, например, стендовые испытания параметров резки отдельных зерен /в специальном приспособлении для резки от 1 до 15 зерен/, измерения характеристик молотковых, дисковых и валковых дробилок – с целью сравнения и исследования сложных энергетических зависимостей в процессе дробления кормов.

Был определен фонд показателей для оценки качества конструкции зернодробилок. Используя целевую функцию дробления, был предложен план энергетической процедуры, проверяющей: материал – машины – процесс дробления.

Предложенные методы планирования экспериментов с целью идентификации были направлены на потребности конструкторской базы строения дробилок. При этом учитывались особенности конструкторских экспериментов с испытаниями прочности квази-срезания зерен, вопросы динамических характеристик функциональных и приводных систем и внутренняя энергия дробленого материала.

Разработанная конструкторская база строения многодисковых дробилок обеспечивает определение и указание: поверхности дробления, напряжений и работы в процессе дробления, а также динамических характеристик двигателя с механической передачей.

В исследованиях использовалась оригинальная компьютерная система сбора, обработки и визуализации данных, статического анализа и проверки конструкторских моделей. Была разработана процедура компьютерного вспоможения конструкции многодисковых дробилок /типа САД/: МОДЕЛЬ КВАЗИ-СРЕЗКИ.



Biblioteka Główna ATR
w Bydgoszczy

75443

ISSN 0209-0597