

Dr inż. Andrzej Tomporowski

Wydział Inżynierii Mechanicznej
UTP w Bydgoszczy
Ul. Prof. S. Kaliskiego 7/ bud. 3.2.pok 202
85- 788 Bydgoszcz
e-mail: a.tomporowski@utp.edu.pl

Strumień wydajności wielotarczowego rozdrabniania ziaren ryżu

Słowa kluczowe: rozdrabnianie, biomateriały, wydajność

Streszczenie: Poszukiwania rozwiązań konstrukcyjnych zespołów rozdrabniających ziarna zbóż, prowadzące do energooszczędnych procesów produkcyjnych uzasadniają podjęcie badań nad doskonaleniem teorii i konstrukcji rozdrabniaczy. Istotny wpływ na wydajność, funkcjonalność i sprawność procesu rozdrabniania ziarna ryżu mają trudne do opisanie zjawiska zachodzące w przestrzeni roboczej rozdrabniacza. Pomimo, że dostępne są opracowania na temat podstaw funkcjonalności i badań rozdrabniaczy wielotarczowych [m.in.1,2,4], jak dotychczas nie podejmowano próby opisu wpływu cech i zachowań rozdrabnianego materiału na wydajność, sprawność i użyteczność procesu rozdrabniania biomateriałów. Podstawą do poprawy funkcjonalności działania maszyny rozdrabniającej jest przeprowadzone rozpoznanie możliwości istniejących rozwiązań oraz określenie zakresu, skutecznych w przetwórstwie, cech konstrukcyjnych zespołu roboczego z obszaru dopuszczalnego. Spełnienie kryteriów może być osiągnięte między innymi na drodze celowego sterowania cechami konstrukcyjnymi zespołu wielotarczowego. Aby jednak działania te przyniosły planowane korzyści, konieczne staje się poznanie zależności oraz opracowanie opisu matematycznego przepływu rozdrabnianego ziarna przez przestrzeń roboczą rozdrabniacza wielotarczowego, jako zmiennej wynikowej konstrukcji i działania zespołu roboczego.

1. Wprowadzenie

Innowacyjne podejście w badaniach konstrukcyjnych polega na projektowaniu celów, środków lub technik działania, które nie weszły jeszcze w skład praktyki, a tym bardziej w skład wiedzy inżynierskiej. Zabiegi weryfikacyjne zaś mogą dotyczyć takich problemów rozdrabniania, jak dynamika zmian długości początkowej ziaren, transport materiału rozdrabnianego (ziaren o różnej długości) z jednoczesnym quasi-ścianianiem pomiędzy kolejnymi tarczami, strumień cząstek opuszczających maszynę z daną intensywnością i w określonych warunkach. W ten sposób wiedza o konstrukcji rozdrabniaczy, jako nauka praktyczna i empiryczna bada nie tylko to co jest, lecz także to co mogłoby być, a co na razie istnieje tylko w sferze koncepcji [1, 2, 3, 5].

Cel badań. Podstawowym celem badań było określenie czynników, cech konstrukcyjnych i użytkowych oraz ich wpływu na dynamikę oraz wydajność procesu rozdrabniania biosurowców ziarnistych (ryż długoziarnisty). Analizy dokonano na przykładzie rozdrabniacza wielotarczowego wykonanego wg patentu UTP w Bydgoszczy [3]. Dodatkowo, celem pracy było przybliżenie złożoności zjawisk, procesów i relacji rozdrabniania wielotarczowego.

2. Model rozdrabnianych ziaren ryżu

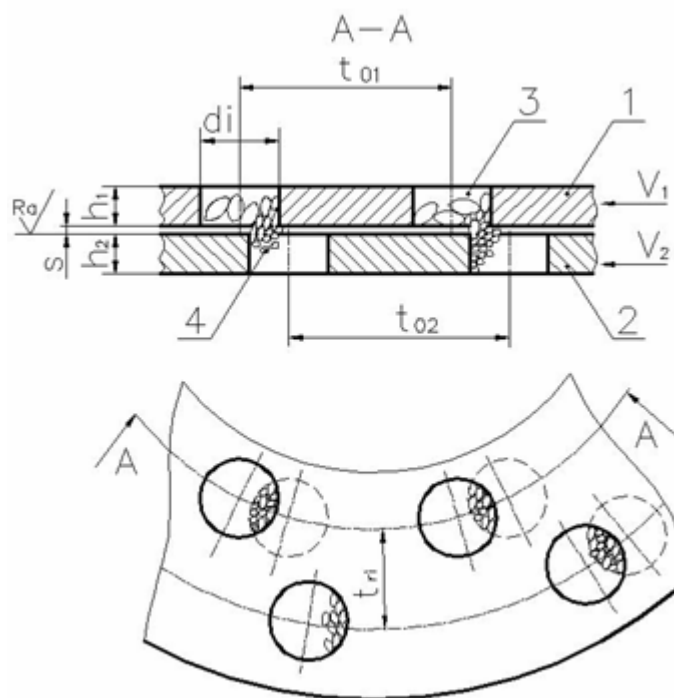
Materiałem wsadowym w prowadzonych badaniach wydajności (objętościowej, masowej) są ziarna ryżu długoziarnistego o stabilizowanych parametrach zarówno wilgotnościowych, oraz konfekcjonowanej wielkości. Założono więc, że dla potrzeb niniejszego rozważania wyjściowym modelem wsadu, rozdrabnianego ziarna będzie substancja rozdrabniana w jednym wymiarze o powtarzalnej, stałej wielkości pojedynczego ziarna.

Przyjmuje się, że ziarna ryżu ustawiają się w otworach tarcz rozdrabniających, wzdłuż swojej dłuższej osi, prostopadle do międzytarczowej płaszczyzny cięcia.

Granulometryczny stan rozdrabnianego medium ρ_n^m w przestrzeni roboczej rozdrabniacza wielotarczowego, wielootworowego opisuje rozkład prawdopodobieństwa długości ziarna. Ponieważ materiał w otworach tej samej tarczy podlega takiemu samemu procesowi cięcia w każdym otworze, jego stan indeksowany jest numerem tarczy (n) oraz numerem cięcia (m):

$$\rho_n^m : (0, l_{\max}] \rightarrow [0, 1], \quad \int_0^{l_{\max}} \rho_n^m dl = 1. \quad (1)$$

Przemieszczenie materiału do następnej tarczy wiąże się z przejściem przez proces cięcia, zatem $n \leq m$. Początkowy stan granulometryczny materiału w otworze pierwszej tarczy (wszystkie ziarna są całe, nie rozdrobnione) przed pierwszym cięciem wynosi ρ_0^0 i jest wejściowym stanem materiału, który w dalszej części opracowania zostanie opisany pewną funkcją skupioną wokół wartości długości l_{\max} .



Rys.1. Technika (sposób i środek konstrukcyjny) ustawienia tarcz w rozdrabniaczu przy quasi – ścinaniu materiału ziarnistego [2]; 1- tarcza poprzedzająca, 2 - tarcza następująca, 3 - wejściowy stan materiału, 4 - następny stan materiału, d_i - średnica otworu, t_{01}, t_{01}, t_{01} - podziałka, h_1, h_2 - grubość tarcz, s – szczelina, v_1, v_1 – prędkość liniowa

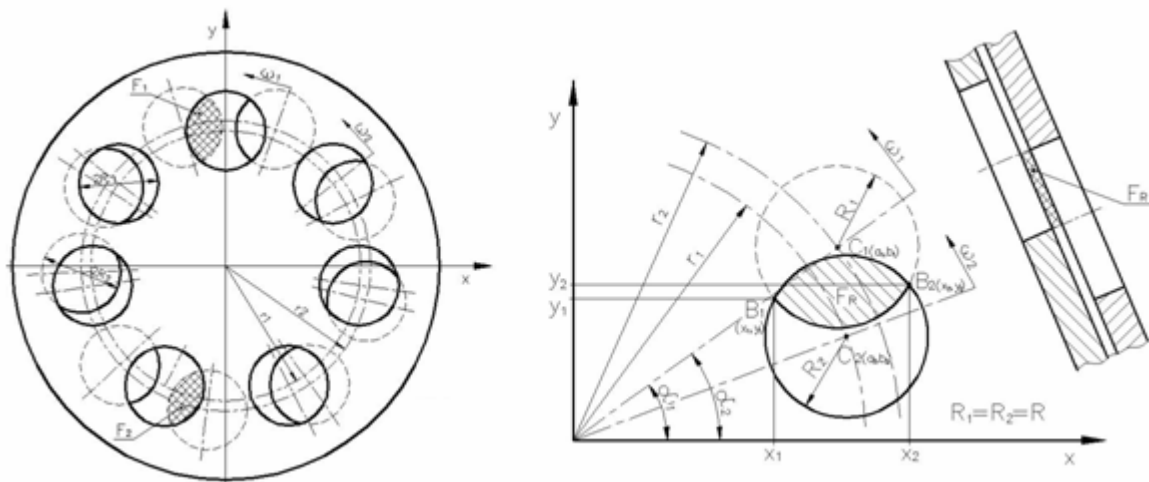
Wyjściowy stan materiału podczas rozdrabniania zmienia się na skutek dwóch czynników, mechanizmów (Rys.1): rozdrabniania (quasi-ścianania) oraz usuwania ziaren o rozmiarze pożądanym i mniejszym, z przestrzeni międzytarczowych zespołu rozdrabniającego urządzenia.

3. Proces rozdrabniania

W momencie, w którym spotykają się otwory z dwóch sąsiednich tarcz (Rys.2), a ich wzajemny przekrój zaczyna się powiększać (0, max), następuje wypełnianie następującego

otworu częścią materiału rozdrabnianego z otworu poprzedzającego. Żeby proces cięcia zachodził wydajnie, efektywnie, otwór w tarczy poprzedzającej musi być całkowicie wypełniony w momencie, gdy zaczyna się zmniejszać wzajemny przekrój otworów ($\max, 0$). W tym celu powinny być spełnione trzy warunki:

1. Ilość materiału w otworze poprzedzającym musi być zawsze większa od dostępnego miejsca w otworze następującym. W przeciwnym wypadku można sobie wyobrazić przesypywanie się materiału z otworu tarczy poprzedzającej do otworu tarczy następującej bez jego cięcia na całej długości urządzenia. Ponieważ część materiału jest usuwana do przestrzeni pomiędzy tarczami, objętość otworów w tarczy następującej powinna być zawsze mniejsza niż w tarczy poprzedzającej (realizuje się to poprzez mniejszy przekrój otworu lub mniejszą grubość tarczy, tu jednak ograniczeniem są względy konstrukcyjne, naprężenia, które tarcza musi przenosić).
Grubość (h) n -tej tarczy, dla potrzeb obliczeń, oznaczono przez y_n , natomiast przez $\tilde{y}_n^{(k)}$ oznaczono wysokość, do której materiał wypełnia otwór w n -tej tarczy przed k -tym cięciem.
2. Każdy punkt przekroju otworu następującego powinien w pewnym momencie ruchu względnego tarcz znaleźć się na obszarze przekroju otworu z tarczy poprzedzającej.
3. W momencie, gdy następuje cięcie, otwór w tarczy następującej jest zamknięty na przejście kolejną tarczą (nie powstają tzw. korytarze otworowe).



Rys.2. Pole przekroju i efektywna powierzchnia rozdrabniania dla dwóch tarcz rozdrabniania między krawędziami otworów rozdrabniających [2], F_R – międzyotworowe pole powierzchni cięcia (np. F_1, F_2)

Wypełnienie otworu w warstwie zmienia się następująco (Rys.3).

Z rozważań wynika, że k -te cięcie za tarczą $(n-1)$ -szą następuje we wcześniejszym momencie niż k -te cięcie za tarczą n -tą. Przy tak przyjętej numeracji cięcia, quasi-ścianania (na każdej tarczy numeracja zaczyna się od pierwszego cięcia), ziarno może na każdej granicy poszczególnych tarcz podlegać cięciu o tym samym numerze.

Po wypełnieniu otworu zaczyna się zmniejszanie części wspólnej przekrojów otworów, proces cięcia (quasi-ścianania). Wstępnie założono, że każde ziarno w przekroju otworów rozdrabniających podlega procesowi cięcia. Położenie ziarna względem płaszczyzny, w której odbywa się cięcie jest losowe z rozkładem równomiernym. Ziarno każdej długości rozpadnie (rozdrobni) się z jednakowym prawdopodobieństwem na dwie mniejsze cząstki, o sumie długości będącej długością (wymiarom) przed cięciem.

Cięcie, a w zasadzie quasi-ściananie następuje zawsze w materiale, który przed zasypaniem był w poprzedzającej tarczy. Rozkład długości ziarna, przy cięciu, w materiale, który uzupełnił pustą przestrzeń w tarczy (n+1)-szej zmienia się według zależności:

$$\tilde{\rho}_{n+1}^m(x) = A_{n,m} \rho_n^m = \left(1 - \frac{x}{y_{n+1} - \tilde{y}_{n+1}^m}\right) \rho_n^m(x) + \frac{1}{y_{n+1} - \tilde{y}_{n+1}^m} \int_x^{l_{\max}} \rho_n^m(l) dl, \quad (2)$$

natomiast w materiale, który pozostał w tarczy n-tej:

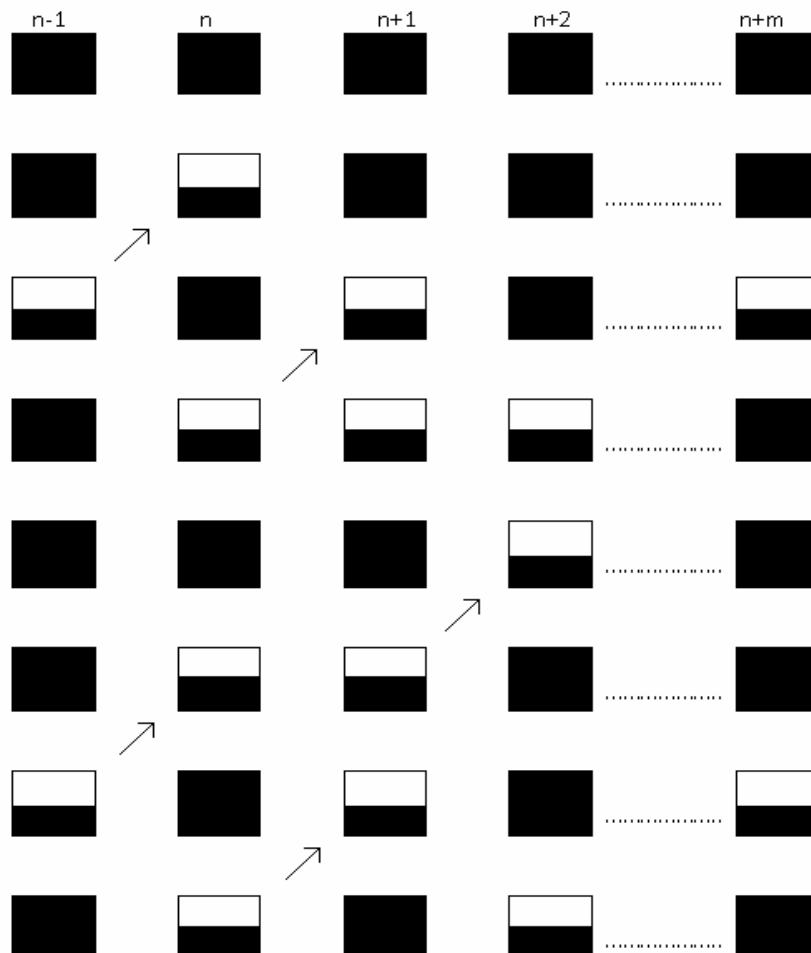
$$\tilde{\rho}_n^{m+1}(x) = \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m = \left(1 - \frac{x}{\tilde{y}_n^m}\right) \rho_n^m(x) + \frac{1}{\tilde{y}_n^m} \int_x^{l_{\max}} \rho_n(l) dl, \quad (3)$$

Funkcje, które otrzymano są nieujemne, jako suma dwóch nieujemnych składników. Całkując od 0 do l można łatwo sprawdzić, że są to rozkłady prawdopodobieństwa:

$$\int_0^{l_{\max}} \tilde{\rho}_n^{m+1}(x) dx = 1 - \frac{\bar{x}}{\tilde{y}_n^m} + \frac{1}{\tilde{y}_n^m} \int_0^{l_{\max}} \int_x^{l_{\max}} \rho_n(l) dl dx = 1 - \frac{\bar{x}}{\tilde{y}_n^m} + \frac{1}{\tilde{y}_n^m} \int_0^{l_{\max}} \int_0^x \rho_n(l) dx dl = 1$$

$$1 - \frac{\bar{x}}{\tilde{y}_n^m} + \frac{1}{\tilde{y}_n^m} \int_0^{l_{\max}} x \rho_n(l) dx = 1 \quad (4)$$

i tak samo dla rozkładu $\tilde{\rho}_{n+1}^m$. Zatem operatory $A_{n,m}$ i $\tilde{B}_{n,m}$ są poprawnie określonymi operatorami stochastycznymi.



Rys.3. Schemat transportu materiału rozdrabnianego z quasi-ściananiem pomiędzy kolejnymi tarczami; gdzie ↗ oznacza fazę cięcia

Dla uproszczenia założono, że po cięciu rozkład długości ziarna w tarczy $(n+1)$ -szej będzie jednorodny (frakcja cięta i ta która była w otworze przed cięciem się wymieszają), będzie ona zatem średnią ważoną z ρ_{n+1}^k i ρ_n^k :

$$\rho_{n+1}^m(x) = \frac{\tilde{y}_{n+1}^m}{y_{n+1}} \rho_{n+1}^{m-1} + \frac{y_n - \tilde{y}_{n+1}^m}{y_{n+1}} A_{n,m} \rho_n^m(x) \quad (5)$$

4. Proces usuwania

Po rozcięciu dwie warstwy materiału przesuwają się względem siebie zgodnie z kierunkiem obrotów sąsiednich tarcz i gradientem wzajemnych prędkości. Drobinny materiału są usuwane z otworu poprzedzającego (działa na nie siła składowa siły grawitacji o kierunku prostopadłym do szczeliny międzyczarzowej), natomiast nie są usuwane z otworu następującego (ponieważ składowa prostopadła siły grawitacji jest w kierunku od szczeliny).

Po cięciu rozkład długości będzie zatem wynosił:

$$\tilde{\rho}_n^{m+1}(x) = B_{n,m} \rho_{n,m} = \begin{cases} \tilde{\rho}_n^{m+1}(x) \left(\int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \tilde{\rho}_n^{m+1}(x) \right)^{-1} & x > l_{\max} \\ 0 & x < l_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

Poziom materiału po m -tym cięciu (przed $m+1$ cięciem) w n -tej szczelinie, \tilde{y}_n^{m+1} wynosi:

$$\tilde{y}_n^{m+1} = (y_n - y_{n+1} + \tilde{y}_{n+1}^k) \left(1 - \frac{\int_0^{l_{\min}} \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m(x) x dx}{\int_0^{l_{\max}} \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m(x) x dx} \right) \quad (7)$$

Żeby uzyskać rozkład w całej przestrzeni otworu przed $(m+1)$ -szym cięciem (po ponownym zasypaniu), należy wziąć średnią ważoną:

$$\rho_n^{m+1}(x) = \frac{y_n - \tilde{y}_n^{m+1}}{y_n} A_{n-1,m} \rho_{n-1}^m + \frac{\tilde{y}_n^{m+1}}{y_n} B_{n,m} \rho_n^m \quad (8)$$

Operator $B_{n,m}$ nie jest już operatorem liniowym jak $A_{n,m}$, ponieważ zależy od poziomu materiału, który pozostał w tarczy n -tej po m -tym cięciu: \tilde{y}_n^{m+1} , i jest funkcją rozkładu prawdopodobieństwa w materiale (który wpływa na to, jaka część materiału będzie usuwana z maszyny przy cięciu) [6]. Żeby móc traktować $B_{n,m}$ jako operatory liniowe, wielkości y_n^m należy traktować, w każdym kroku procedury, jako z góry zadane i iteracyjnie uzgadniane z wynikami badań, doświadczeń.

5. Strumień cząstek opuszczających maszynę

Przy cięciu m -tym, strumień cząstek opuszczających maszynę przez szczelinę (na przerwie) pomiędzy tarczą n -tą i $(n+1)$ -szą jest dany rozkładem prawdopodobieństwa:

$$s_n^m(x) = \begin{cases} \int_x^{l_{\max}} \rho_n(l) dl \left(\int_0^{l_{\min}} \int_x^{l_{\max}} \rho_n(l) dl dx \right)^{-1} & l < l_{\min} \\ 0, & l > l_{\min} \end{cases} \quad (9)$$

a jego objętość jest równa:

$$V = (y_n - y_{n+1} + \tilde{y}_{n+1}^k) \frac{\int_0^{l_{\min}} \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m(x) x dx}{\int_0^{l_{\max}} \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m(x) x dx} \quad (10)$$

6. Przemiany rozkładów długości w tarczach

Rozkład długości ziaren w n -tej tarczy po m -tym cięciu wyrażono oznaczeniem ρ_n^m . Operatory przeprowadzające rozkład ρ_n^m w ρ_{n+1}^m i w ρ_n^{m+1} są oznaczone odpowiednio jako $A_{n,m}$ i $B_{n,m}$. Zmiany rozkładów ilustruje diagram wydajności (Rys.4).

ρ_0^0		ρ_0^0		ρ_0^0				
	↘		↘		↘			
ρ_0^0	B0,0 →	ρ_1^0	B0,0 →	ρ_2^0	B0,0 →	ρ_3^0	B0,0 →	...
	↘		↘		↘			
ρ_1^0	B1,0 →	ρ_1^1	B1,1 →	ρ_1^2	B1,2 →	ρ_1^3	B1,3 →	...
	↘		↘		↘			
ρ_2^0	B2,0 →	ρ_2^1	B2,1 →	ρ_2^2	B2,2 →	ρ_2^3	B2,3 →	...
⋮		⋮		⋮		⋮		↘

Rys.4. Wydajnościowy diagram rozkładów długości ziaren, produktów quasi-ścianania, w poszczególnych tarczach

Stan ρ_0^0 jest dany (rozkład długości ziaren w materiale wejściowym). Stan ρ_n^m uzyskano z działania sum iloczynów operatorów A i B na stanie ρ_0^0 . Iloczyn reprezentują wszystkie drogi, którymi można dojść do tego stanu ze stanu ρ_0^0 . Dla przykładu:

$$\rho_2^3 = (A_{1,2}A_{0,1}B_{0,0} + A_{1,2}B_{1,1}A_{0,0} + B_{2,2}A_{1,1}A_{0,0})\rho_0^0 \quad (11)$$

Do stanu ρ_n^m można dojść stosując n razy operator A i m razy operator B ¹. Drogę określa jednoznacznie podzbiór n -elementowy zbioru kroków w całej drodze $\{1, \dots, m\}$, kroków, w których działa operator A . Ilość takich podzbiorów, zatem iloczynów w sumie wynosi $\binom{m}{n}$. W ogólności operatory A i B nie komutują. Dla dalszych rozważań kluczowe będzie obliczanie takich wyrażeń.

Stany ρ są dodatnimi elementami przestrzeni Banacha¹ $L(0, 1)$, a operatory A i B są endomorfizmami tej przestrzeni. Z przyczyn praktycznych można przybliżyć stany ρ dodatnimi elementami R^d , a operatory A i B macierzami $d \times d$. Fizycznie odpowiada to podziałowi cząstki o długości l na d niepodzielnych już dalej części o długości l/d – odpowiadającej liniowej mierze rozdrobnienia.

¹ precyzyjniej, średnie wazone wyniku działania tego operatora

7. Przepływ energii

Przy założeniu nieskończenie szybkiego rozchodzenia się naprężeń, w momencie, gdy zaczyna się zamykanie obszaru wspólnego dwóch otworów następuje w każdym ziarnie równomierne zgęszczanie materiału, aż do przekroczenia progowego zgęszczenia, po którym następuje pęknięcie ziarna. Po pęknięciu następuje przesuwanie się warstw względem siebie, przy czym siła tarcia jest stała na jednostkę sąsiadujących powierzchni dwóch warstw. Oprócz tego dochodzi stałe tarcie materiału o powierzchnie tarcz, w miejscach, gdzie w tarczy następującej nie ma otworu.

8. Wnioski

Zjawiska, procesy i relacje rozdrabniania wielotarczowego, pomimo swojej złożoności, należą do dość podatnych na opisy formalne. Uzyskanie odpowiedzi na pytanie o czynniki procesowe (czynności i sposoby), o cechy konstrukcyjne (środki, urządzenia i instalacje), warunki użytkowe i ich wpływ na dynamikę oraz wydajność rozdrabniania ziaren ryżu, na przykładzie rozdrabniacza wielotarczowego, było możliwe, przy założeniu nieskończenie szybkiego rozchodzenia się naprężeń quasi-ścianania, w zakresie:

- rozkładu prawdopodobieństwa długości ziarna,
- rozkładu prawdopodobieństwa cząstek w strumieniu opuszczającym maszynę przez szczelinę między tarczami.

„Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w latach 2010/2013 jako projekt rozwojowy”

Literatura

1. Detyna J. Analysis of nonequilibrium stases in the sieve separation process. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 1(49)2011: 78-85
2. Flizikowski J. Konstrukcja rozdrabniaczy żywności. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2005
3. Flizikowski J., Bieliński K., Bieliński M. Podwyższenie energetycznej efektywności wielotarczowego rozdrabniania nasion zbóż na paszę. Wydawnictwo ATR- OPO, Bydgoszcz 1994
4. Flizikowski J., Bieliński M. Rozdrabniacz wielotarczowy zwłaszcza do materiałów ziarnistych. Patent RP-144 566
5. Kaleta A., Wojdalski J. Przetwórstwo rolno-spożywcze. Wybrane zagadnienia inżyniersko-produkcyjne i energetyczne. Warszawa 2007
6. Razavi S.M.A., Farahmandrar R. Effect of hulling and milling on the physical properties of rice grains. International Agrophysics, 2008, 22, 353-359