

THE STATE OF THEORETICAL STUDIES ON THRESHING AND SEPARATION OF GRAIN FROM CEREAL MASS

Summary

The wide analysis of literature concerning the theoretical considerations and experimental studies of threshing and separation of grain from cereal mass by different threshing units was carried out. The aim of this analysis was to determine the factors which influence the above mentioned processes, as well as to learn the aspects (methods) of mathematical description of threshing and the grain separation. In the summary the possibility of practical and theoretical use of these studies was indicated.

STAN BADAŃ TEORETYCZNYCH NAD OMŁOTEM I WYDZIELANIEM ZIARNA Z MASY ZBOŻOWEJ

Streszczenie

Przeprowadzono analizę obszernego piśmiennictwa dotyczącego teoretycznych rozważań i eksperymentalnych badań nad procesem omłotu i wydzielania ziarna przez różne zespoły młójące. Celem tej analizy było ustalenie czynników mających wpływ na wyżej wymienione procesy oraz poznanie aspektów (sposobów) matematycznych opisów omłotu i wydzielania ziarna. W podsumowaniu wskazano na możliwości praktycznego i teoretycznego wykorzystania tych prac.

Wstęp

Wprowadzenie intensywnych odmian zbóż i nowych technologii upraw spowodowało znaczący wzrost plonów ziarna z jednostki powierzchni. Plony ziarna pszenicy, wynoszące od 5 do 8 t z ha, uzyskuje się w wielu regionach świata [15]. Zbiór tak wysokich plonów stawia przed techniką rolniczą określone wymagania. Ich spełnienie utrudnia stosunkowo krótki okres zbioru, wynoszący 10-15 dni. Jak dotąd, praktyczną realizację tych wymagań umożliwia powszechne stosowanie kombajnów zbożowych zarówno do zbioru zbóż, jak i innych roślin. Mimo prób wprowadzania innych technologii zbioru można przypuszczać, że w ciągu najbliższych lat kombajny będą nadal niezastąpione. Dąży się jednak do zwiększenia ich przepustowości i wydajności.

Prace naukowców i konstruktorów zmierzające do osiągnięcia tego celu prowadzone są w wielu kierunkach. Jednym z nich jest stosowanie w kombajnie wielobębnowych zespołów młójąco-wydzielających. Zastępują one klasyczne wytrząsacze klawiszowe, ograniczające wydajność kombajnów [15, 16, 17, 48].

Badania nad wielobębnowymi zespołami młójąco-wydzielającymi są szczególnie zaawansowane w Niemczech, we Włoszech i w Polsce [6, 7, 11, 20, 36, 42, 53]. Można przypuszczać, że w warunkach klimatycznych Europy Środkowej kombajny zbożowe z wielobębnowym zespołem młójąco-wydzielającym mogą znaleźć powszechne zastosowanie.

Dotychczas prowadzone badania dotyczą głównie rozwiązań konstrukcyjnych i systemu działania wielobębnowych zespołów młójąco-wydzielających. Ze względu na złożoność procesu omłotu i separacji ziarna, niewiele jest w literaturze prac formułujących modele matematyczne tych procesów [13, 25, 26, 41].

W niniejszej pracy omówiono czynniki wpływające na proces omłotu i separacji ziarna oraz przedstawiono aspekty matematycznego ujęcia tych zjawisk.

Czynniki wpływające na omłot i separację ziarna

Głównym zadaniem kombajnu jest omłot i separacja ziarna z masy poomłotowej w zespole młójąco-wydzielającym. Omłot polega na wydzieleniu ziarna na skutek uderzeń cepów w masę zbożową i wycieraniu kłosów o listwy klepiska. Równocześnie w procesie omłotu częściowo rozdrabniane są źdźbła. Należy zaznaczyć, że omłotowi towarzyszą samowzbudne drgania masy zbożowej w szczeliny roboczej. Proces ten jest bardzo złożony i ma charakter stochastyczny. Separacja zaś oznacza przesianie uprzednio wymłóconego ziarna przez warstwę słomy i klepisko.

Jakość omłotu i separacji zależy od różnych czynników, które można podzielić na trzy podstawowe grupy:

- parametry konstrukcyjno-dynamiczne zespołu młójącego (rodzaj bębnow, prędkość obwodowa cepa, liczba i kształt cepów, wielkość szczeliny roboczej, kształt i rozmieszczenie listew oraz kąt opasania klepiskiem bębna wydzielającego),
 - właściwości materiału roślinnego (gatunek i odmiana, wilgotność i faza dojrzałości, budowa kłosa i siła wiązania ziarna z kłosem, stosunek masy ziarna do masy słomy, zachwaszczenie i inne),
 - zasilanie zespołu młójąco-wydzielającego (miejsce i ułożenie podawanych roślin względem osi bębna, prędkość, grubość i równomierność warstwy zasilania).
- Podczas omłotu bardzo ważną rolę odgrywają fizyko-mechaniczne właściwości roślin, stąd w niniejszej pracy ograniczono się głównie do ich omówienia. Analizowane cechy fizyko-mechaniczne to:
- siła i energia wiązania ziarna z kłosem,
 - sprężystość i elastyczność ziaren i połączeń ziarna z kłosem,
 - wytrzymałość ziarna na uszkodzenia,
 - współczynnik tarcia.

Najbardziej istotny związek z procesem omlotu ma siła i energia wiązania ziarna z kłosem [5, 46, 47, 50]. Dotychczasowe badania prowadzono metodami, które ogólnie można podzielić na: bezpośrednie, wirówkowe, udarowe.

Obszerne badania siły i energii wiązania ziarna z kłosem metodą bezpośrednią przy pomocy mikrozrywarki przeprowadził Reznicek [47], który stwierdził, że średnie wartości siły wiązania ziarna w kłosie dla pszenic jarych zmieniały się od 0,96 do 1,72 N, a u pszenic ozimych od 1,02 do 2,09 N. Natomiast dla żyta zakres zmienności wynosił od 0,81 do 1,31 N. Ponadto autor ten określił minimalną energię niezbędną do ekstrakcji ziarna z kłosa, której wielkość zawarta była w przedziale 0,32÷1,28 mJ. Wyniki Reznicka [47] potwierdzili również polscy badacze [18, 19, 50].

Metodę wirówkową stosowali do określenia siły wiązania ziarna w kłosie Gąska i in. [18, 19] i Basnak'jan [5].

Na podstawie badań metodami wirówkowymi stwierdzono, że siły wiązania ziarna z kłosem dla różnych odmian pszenicy zawiera się w granicach od 0,27 do 0,76 N [18, 19]. Omawiane dotąd badania były prowadzone przy quasi-statycznym przebiegu sił odrywających ziarno od kłosa. W rzeczywistości mamy tu do czynienia z oddziaływaniem dynamicznym o charakterze udarowym.

Badania omlotowości metodą udarową prowadził jako jeden z pierwszych Pustygin [46]. W eksperymentach tych wykazano, że energochłonność wydzielania ziarna zmienia się w zależności od terminu zbioru (fazy dojrzałości zboża) oraz od wilgotności masy zbożowej.

Drugą cechą fizykomechaniczną roślin ważną przy omlocie i separacji są właściwości sprężyste i plastyczne ziarna oraz struktura kłosa. Najczęściej właściwości te określa się takimi parametrami mechanicznymi jak: moduł sprężystości podłużnej i poprzecznej, moduł Poissona oraz moduł ściśliwości. Badania tych wielkości prowadziło wielu autorów, a ich wyniki są krańcowo rozbieżne. Próbę syntetycznego przedstawienia tych badań podjęli Kutzbach i Kusterman [35] oraz Dreszer i in. [15]. Według danych zamieszczonych w pierwszej z tych publikacji moduł sprężystości podłużnej ziarna przyjmuje wartości od 10 do 20 kN · m⁻¹, a moduł Poissona wartości od 0,3 do 0,5. Wielkości te zależą od gatunku zboża, ale także w dużym stopniu od jego wilgotności.

Tarcie w procesie omlotu i separacji może oddziaływać pozytywnie (dzięki niemu odbywa się np. przemieszczanie masy zbożowej) lub negatywnie, powodując owijanie słomą bębnow młócących, zapychanie urządzenia itp. W technice rolniczej operuje się pojęciem tarcia statycznego, tarcia kinetycznego oraz tarcia wewnętrznego. Wartość współczynnika tarcia kinetycznego zależy od prędkości przesuwu materiału względem podłoża, wilgotności materiału oraz rodzaju powierzchni i materiału, z jakiego wykonane są elementy robocze maszyn rolniczych.

Wraz ze zmniejszaniem zawartości suchej substancji zwiększa się wartość współczynnika tarcia kinetycznego [15]. Domieszki wilgotnych chwastów również powodują zwiększanie wartości współczynnika tarcia kinetycznego. Oprócz wilgotności słomy, o siłach tarcia w czasie przemieszczania decyduje również prędkość przesuwu. Dla ziarna, analogicznie jak dla słomy, wartości współczynników tarcia zależą od wilgotności ziarna, gatunku i odmiany zboża, prędkości przesuwu, a nawet od ciśnienia wywieranego na jego warstwę [15, 27].

Modele matematyczne stosowane do opisu omlotu i separacji ziarna

Próby teoretycznego ujęcia procesu omlotu w klasycznych zespołach młócących w formuły matematyczne podejmuje się od dawna. Jednymi z pierwszych badaczy, którzy podjęli się opisu tego zjawiska byli Pustygin [46] i Goriaczkin [23]. Autorzy wychodząc ze znanej zależności między pędem i popędem przyjęli, że uderzenie cepa młócącego o warstwę zboża jest niesprężyste, a prędkość masy zbożowej w szczelinie roboczej jest równa prędkości obwodowej bębna. Bazując na tych założeniach Goriaczkin [23] określił, że moc potrzebna na pracę bębna młócącego (opór młocki) jest równa:

$$P = \frac{Q \cdot v^2}{1 - f} \quad (1)$$

gdzie:

f – współczynnik przecierania masy zbożowej w szczelinie roboczej, wynoszący dla bębna cepowego 0,65-0,75,
 v – prędkość obwodowa cepów bębna młócącego [m/s],
 Q – zasilanie masą zbożową [kg/s].

Późniejsze badania doprowadziły do skorygowania wzoru Goriaczkina przez wprowadzenie współczynnika zmniejszającego prędkość masy zbożowej w wyniku poślizgów między cepami a przesuwaną masą słomiastą.

Oprócz zagadnień energetycznych, głównym przedmiotem zainteresowań badawczy jest określenie masy ziarna wydzielonego i przesianego przez klepisko w procesie omlotu.

Badania empiryczne wielobębnowych separatorów ziarna prowadził w latach trzydziestych ubiegłego stulecia Letoszniew [40]. Stwierdził on, że ilość ziarna nie wydzielonego przez wielobębnowy zespół można opisać zależnością:

$$Z = X \cdot e^{-k\chi} \quad (2)$$

gdzie:

Z - ilość ziaren nie wydzielonych, kg
 X - ilość ziaren dostarczonych do zespołu wydzielającego, kg,
 k - liczba bębnow wydzielających, szt.,
 χ - współczynnik charakteryzujący zdolność wydzielania ziarna ze słomy przez jeden bęben wydzielający.

Lipkowicz [41] przedstawił model deterministyczny i probabilistyczny procesu omlotu i separacji. Punktem wyjścia analizy obu procesów jest układ równań różniczkowych, opisujących dynamikę zmian masy ziaren:

$$\frac{dX}{dt} = -\beta X; \quad \frac{dY}{dt} = \beta X - \gamma Y; \quad \frac{dZ}{dt} = \gamma Y \quad (3)$$

gdzie:

X – masa ziaren zawartych w kłosach dostarczonych do zespołu młócąco-wydzielającego [kg],
 Y – masa ziaren wydzielonych [kg],
 Z – masa ziaren nie wymłóconych i wymłóconych, ale pozostających w masie słomiastej [kg],
 β, γ – stałe parametry procesu wyznaczane doświadczalnie.

Model probabilistyczny wyżej omówionego procesu zbudowany jest na podstawie wyników pracy Kendalla [28], według którego masę ziaren wydzielonych w czasie t określa zależność:

$$Y = X \left\{ \exp \left[pXt - \frac{X}{\beta} (1 - e^{-\beta t_0}) - \exp(\beta t) \right] \right\} \quad (4)$$

gdzie:

p – iloczyn prawdopodobieństwa przeniknięcia ziarna przez konstrukcję klepiska i warstwę słomy [%].

Konkludując swoje rozważania Lipkowicz [41] stwierdził, że najdokładniejszą dynamikę stanu końcowego procesu omlot-separacja można opisać wykorzystując oba modele.

Zależność stopnia separacji od fizyko mechanicznych cech masy zbożowej i parametrów konstrukcyjnych zespołu młócającego badali również inni autorzy. Teorie ich opierają się na zależności podanej przez Arnolda [2, 3], w myśl której zależność między masą odseparowanego ziarna a drogą wzdłuż klepiska można wyrazić funkcją wykładniczą:

$$Y = X [1 - \exp(-\mu_s L)] \quad (5)$$

gdzie:

Y – masa odseparowanego ziarna, kg,

L – długość klepiska, m,

μ_s – współczynnik intensywności separacji, m^{-1} ,

X – masa ziarna na początku procesu separacji, kg.

Zgodnie z tym wzorem prawdopodobieństwo przesiania danego ziarna przez klepisko (pod warunkiem, że nie zostało ono wcześniej odseparowane) jest w każdej chwili stałe, niezależnie od poprzedzających stanów tego procesu.

Ałfierow i Braginiec [1] uwzględniając fakt, że w zespole młócającym separacja przebiega równocześnie z omlotem założyli, że ziarno może być odseparowane pod warunkiem, że zostało wcześniej uwolnione z kłosa. Na tej podstawie wyprowadzili zależność między stopniem separacji ziarna przez klepisko a drogą materiału w szczelinie roboczej, która przyjęła postać:

$$Y = 1 - e^{-\mu_s L} + \left[\mu_s e^{-A} (e^{-\mu_o L} - e^{-\mu_s L}) \right] / (\mu_o - \mu_s) \quad (6)$$

gdzie:

A, μ_o – współczynniki charakteryzujące intensywności omlotu.

Caspers [9, 10] rozwija i weryfikuje eksperymentalnie wyżej zależności uwzględniając wpływ innych czynników związanych z konstrukcją zespołu młócającego i cech fizyko mechanicznych masy zbożowej. W konsekwencji wzór Caspersa przybiera następującą postać:

$$Y = 100 \left[1 - \exp \left(\frac{-\lambda X^\psi}{\phi} \right) \right] \quad (7)$$

gdzie:

ψ – współczynnik omlotu,

λ – współczynnik uwzględniający długość klepiska,

ϕ – współczynnik zagęszczenia masy zbożowej w szczelinie roboczej,

χ – współczynnik obciążenia zespołu młócającego, rosnący wraz ze wzrostem przepustowości.

Inni autorzy [25] opisali proces omlotu i przenikania ziarna przez warstwę młóconej masy i przesiewania przez klepisko, traktując go jako zmienną losową o wykładniczym rozkładzie w postaci:

$$f(t) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

gdzie:

$$\tau = k_m \sqrt{\frac{\delta}{g + \frac{2v^2}{D}}} - \text{czas przenikania ziarna przez warstwę}$$

omłotową w szczelinie roboczej [s],

$k_m = 2,25$ – współczynnik przenikania ziarna przez warstwę zboża w szczelinie roboczej,

$$\delta = \frac{Q}{\rho v s} - \text{grubość warstwy zboża w szczelinie roboczej}$$

między bębniem a klepiskiem [m],

ρ – gęstość masy omłotowej [$kg \cdot m^{-3}$],

$v = 0,5(k_p v_p + \xi v_c)$ – prędkość masy zbożowej w szczelinie omłotowej [$m \cdot s^{-1}$],

$k_p = 0,4$ – współczynnik poślizgu masy zbożowej na przenośniku,

v_p – prędkość podawania masy zbożowej przez przenośnik [$m \cdot s^{-1}$],

$\xi = 0,4-0,5$ – współczynnik charakteryzujący poślizg oraz sprężystość młóconego zboża w czasie przebiegu procesu,

v_c – prędkość obwodowa cepów bębna młócającego [$m \cdot s^{-1}$],

s – szerokość bębna młócającego [m],

g – przyspieszenie grawitacyjne [$m \cdot s^{-2}$],

D – średnica bębna młócającego [m].

Formułę na współczynnik charakteryzujący zdolność wydzielania i przesiewania ziarna η dla dwubębnowego zespołu młócającego podał Seryj [49]. Korzystając z doświadczeń Arnolda [2], Caspersa i innych [8, 9, 10], przedstawił wzór:

$$\eta = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{F_0}{F} \left(1 - \frac{2l_z \pi d}{2\pi \left(2 \sqrt{\frac{s \varepsilon v C \rho' v}{\pi Q (1 - \theta) l - d_z}} \right)} \right) \frac{4 \sum n \cdot i}{60 \cdot \omega} \right] \Delta \right\} \quad (9)$$

gdzie:

f_0 – powierzchnia otworów klepiska, m^2 ,

F – całkowita powierzchnia klepiska, m^2 ,

l_z – średnia długość pojedynczego źdźbła, m,

D – średnia grubość ziarna młóconego zboża, m,

ε – współczynnik wykorzystania szerokości zespołu młócająco-wydzielającego,

C – średnia wielkość szczeliny roboczej pomiędzy bębniem a klepiskiem, m,

ρ' – średnia masa źdźbła, kg,

$\theta = \frac{m_s}{m_z + m_s}$ – współczynnik,

m_s – masa słomy, kg,

m_z – masa ziarna, kg,

l_z – średnia długość ziarna, m,

d_z – średnia średnica źdźbła, m,

i – liczba cepów na bębnie, sztuk,

n – obroty bębnowy wydzielających, obr/min.

Z cytowanych opracowań wynika, że przy opisie procesu omlotu autorzy posługiwali się szeregiem współczynników wyrażających właściwości młóconej masy zbożowej oraz wprowadzali wiele różnych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych.

W konsekwencji w wielu przypadkach sformułowano skomplikowane równania mało przydatne dla celów praktycznych.

Oprócz wielu wniosków wynikających z przedstawionego materiału, jeden niewątpliwie zasługuje na szczególną uwagę. Można stwierdzić, że wszyscy z cytowanych autorów starali się przedstawić proces wydzielenia ziarna w formie zależności wykładniczej (ogólne prawo separacji). Wykorzystując powyższe badania i analizy na Wydziale Inżynierii Produkcji AR w Lublinie przeprowadzono kompleksowe badania eksperymentalne na podstawie, których sformułowano empiryczną zależność określającą procent wydzielanego i przesianego przez klepiska ziarna (wielobębnowego zespołu) [14]:

$$Y = 64,05 \exp(0,1425k - 0,011k^2) \quad (10)$$

dla $1 \leq k \leq 9$; przy $R^2 = 89,35\%$

gdzie:

R^2 – współczynnik korelacji krzywoliniowej,
 k – ilość bębnow młócająco-separujących.

Analiza wyników badań eksperymentalnych Dreszera [14] pozwoliła Kornackiemu [32] opracować spójną teorię, pozwalającą określić: niedomłot Z_k , ilości ziaren odseparowanych Y_k oraz ziarna wolnego (wymłóconego ale nie przesianego przez klepiska) Z w wielobębnowym zespole młócająco-separującym.

$$Z_k = Z_{k-1}^* e^{-A_k - B_k l} \quad (11)$$

$$Y_k = \left[Z_{k-1}^* (1 - e^{-A_k}) + Y_{k-1} \right] (1 - e^{-\mu_k L_k}) + Z_{k-1}^* \left[\frac{e^{-A_k} + \mu_k e^{-A_k - B_k L_k} - B_k e^{-A_k - \mu_k L_k}}{B_k - \mu_k} \right] \quad (12)$$

$$Z = Q_k e^{-\mu_k l} + Z_{k-1}^* \left[\frac{\mu_k e^{-A_k - B_k l} - B_k e^{-A_k - \mu_k l}}{B_k - \mu_k} \right] \quad (13)$$

gdzie:

$$A_k = \ln \frac{Z_k}{u}, \quad B_k = \ln \frac{Z_k}{u} / (-L_k) - \text{współczynniki intensywności omłotu na k-tym bębnie wydzielającym, m}^{-1},$$

l – współrzędna punktu na klepisku, m,

u – stopień wymłócalności, (-),

Y – masa ziaren wolnych (wydzielonych) pozostających w słomie, kg,

Y_k – masa ziaren odseparowanych na końcu k-tego bębna separującego, kg,

Q_k – masa zboża doprowadzona do k-tego bębna separującego, kg,

Z_k – masa niedomłotu na k-tym bębnie separującym, kg,

Z_k^* – masa niedomłotu na bębnie młócającym, kg,

L_k – długość klepiska k-tego bębna wydzielającego, m.

Bazując na modelach (11, 12, 13) opracowanych przez Kornackiego [32] można rozwiązywać pewne problemy optymalizacyjne. Na przykład dla ustalonej przez eksperymentatora wielkości strat można poszukiwać niezbędnej, minimalnej liczby bębnow zespołu młócającego.

W latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku powstała oryginalna koncepcja kombajnu zbożowego z zespołem młócającym o osiowym przepływie masy zbożowej [24]. Teoretyczne podstawy pracy zespołu omłotowego o osiowym przepływie masy zbożowej (po stożkowej powierzchni) zostały sformułowane przez Lalor'a i Buchele [37, 38]. Autorzy ci sformułowali równanie ruchu masy zbożowej po stożkowej powierzchni w postaci:

$$md' = -\mu(m\omega^2 x' \sin \varphi \sin \alpha \cos \alpha + \mu m \omega^2 x' \cos \varphi \sin \alpha \cos \alpha - 2m\omega x' \sin \alpha) + m\omega^2 x' \sin^2 \alpha \quad (14)$$

gdzie:

m – element objętości masy zbożowej, kg,

x' – tworząca stożek,

μ – współczynnik tarcia masy zbożowej o nieruchomy stożek,

ω – prędkość kątowna, rad/s,

φ – kąt nachylenia linii śrubowej stanowiącej tor elementu masy zbożowej w płaszczyźnie x, z ,

2α – kąt wierzchołkowy stożka,

v' – prędkość elementu masy wzdłuż tworzącej stożka x' , m/s,

a' – przyspieszenie elementu masy wzdłuż tworzącej stożka x' , m/s²,

x, y, z – współrzędne prostokątne.

Znaczne zainteresowanie ośrodków naukowych i konstrukcyjnych nową koncepcją doprowadziło do skonstruowania na początku siedemdziesiątych lat ubiegłego wieku kombajnu zbożowego z osiowym zespołem młócającym.

Miu [43] przedstawił model omłotu i separacji ziarna dla wzdłużnego zespołu młócającego przy pomocy rozkładów wykładniczych. Nowatorstwo pracy polegało na potraktowaniu łącznej masy wydzielonego ziarna jako splotu niezależnych funkcji opisujących omłot i separację w postaci:

$$Y_{(x)} = f \cdot g = \int_0^x f(z)g(x-z)dz \quad (15)$$

Proces omłotu opisuje funkcja:

$$f(x) = \sigma e^{-\sigma x} \quad (16)$$

natomiast proces separacji zależność:

$$g(x) = \pi e^{-\pi x} \quad (17)$$

gdzie:

σ i π – współczynnik strat i współczynnik wydzielenia ziarna,

x oraz z (we wzorze 10) – droga przesuwania się masy zbożowej w urządzeniu młócającym.

Ostatecznie masa wydzielonego ziarna jest równa:

$$Y(x) = \frac{1}{\sigma - \pi} [\sigma(1 - e^{-\pi x}) - \pi(1 - e^{-\sigma x})]. \quad (18)$$

W Polsce badania zespołu młócającego o osiowym przepływie masy zbożowej prowadzone były przez Gierobę, Malickiego [22]. Wynikiem prowadzonych badań i analiz było m.in. opracowanie metody komputerowego rozwiązy-

wania równań ruchu masy zbożowej po stożkowej powierzchni bębna młócająco-wydzielającego oraz parametrów pracy zespołu.

Podsumowanie

Analiza piśmiennictwa wykazała, że proces omlotu i wydzielania ziarna opisywano posługując się wzorami uwzględniającymi szereg różnych czynników lub współczynników. Podawanie zależności opisujących omawiany proces przy uwzględnieniu znacznej liczby, często mało istotnych czynników, rozbudowuje wzory, a tym samym stają się one mało przydatne dla celów praktycznych. Natomiast opis omlotu i wydzielania ziarna za pomocą współczynników na ogół upraszcza równania, lecz jednocześnie uniemożliwia porównywalność wyników oraz zacięra możliwość wyekspozowania wpływu poszczególnych parametrów pracy na przebieg procesu. Ponadto wielkości, uzyskane przy wykorzystaniu tych równań, obciążone są znacznymi błędami.

Skoro wiadomo, że omlot realizowany jest w ściśle określonych warunkach (zakresach parametrów pracy), a wydzielanie ziarna ma określony przebieg, celowe okazało się sprecyzowanie półempirycznych zależności w formie równań wykładniczych. Równania te uwzględniają takie czynniki jak: przepustowość i wilgotność młóconej masy zbożowej oraz wielkość szczelin roboczych i prędkości obwodowe elementów wydzielających itp. Uzyskane w ten sposób zależności mogą być przydatne w pracach badawczych, konstruktorskich i eksploatacyjnych.

Literatura

- [1] Alfierow S.A., Braginiec W.S. 1972: Obmołot i separacja ziarna w młotylitnych ustrojstwach kak jedynij i wierojatnyj process. *Trakt. i sielchozmasziny*, nr 4, s. 24-26.
- [2] Arnold R.E. 1964: Eksperiments with rasp bars and some factors affecting performance theshing drums. *J. Agricult. Eng. Res.*, 9, 99-134.
- [3] Arnold R.E. 1964: Die Bedeutung einiger Einflussgrossen auf die Arbeit der Schlagleistentrommel. *Grundlag. Landtech.*, 21, 42-47.
- [4] Baader W., Sonnenburg H., Peters H. 1969: Die Entmischung eines Korngut-Fasergut-Haufwerkes auf einer vertikal schwingenden, horizontalen Unterlage. *Grundlag. Landtech.*, 5, 149-157.
- [5] Basnak'jan G.A. 1962. Obsypajemosti i obmolacivemosti zernowych kul'tur. *Vestnik Sel'skochozjajstvennoj Nauki*, 30, 59-64. Sielskoizdat. Moskwa.
- [6] Baumgarten J. 2001: Prozesssimulation verbessert die entwicklung von Erntemaschinen. *Landtechnik*, 56, 40-42.
- [7] Budach S. 2001: Rotierende Korn-Stroh-Trennsysteme für Mädröcher mit Tangentialdreschwerk. *Landtech.*, 443-444.
- [8] Caspers L. 1966: Einfluss von Spaltwalte, Spalt und Korbform auf den Dreschvorgang. *Grundlag. Landtech.*, 16, 20-228.
- [9] Caspers L. 1973a. Die Abscheidungsfunktion als Schlegleistend-Druschwerkes. *Landbauforsch. Volkenrode* 19, 221-229.
- [10] Caspers L. 1973b. Die Abscheidungsfunktion als Beitrag zur Theorie des Schlagleistendreschwerkes. Braunschweig-Volkenrod.
- [11] Claar P.W., Porterfield J.G. 1974: Rotary Straw Walker Performance. *Trans. ASAE*, 5, 830-832.
- [12] Czetyrkin B.N., Kosilov N.J., Stiepiczew M.G. 1973: Bezreszietnaja separacija solomistogo worocha. *Mech. Elektr. Soc. Choz.*, 9, 12-15.
- [13] Czyżynałskas D., Ilgakonis P., Szpokas Ł. 1995: Ruch ziarna w zagęszczzonej masie omlotowej. *Probl. Inż. Roln.* 3, 27-34.
- [14] Dreszer K. 1991: Proces wydzielania ziarna w wielobębnowym zespole młócająco-wydzielającym kombajnu zbożowego. Ser. Wyd. – *Rozprawy Naukowe Akademii Rolniczej*, nr 137, Lublin.
- [15] Dreszer K., Gieroba J., Roszkowski A. 1998: Kombajnowy zbiór zbóż. IBMER, Warszawa.
- [16] Freye T., Kutzbach H.D. 1979: Verminderung der Kornverluste von Mähdrescher-Reinigungsanlagen im Hangbetrieb durch Regelung des Luftstroms. *Grundlag. Landtech.* 4, 105-108.
- [17] Freye T., Hejdjann F. 1984: Gebrauchtswertverbesserung an Mähdreschern. Mat. Konf. CIGR-Kongres, 21-28, Budapest, Hungary.
- [18] Gaska R., Kolowca J., Ślipek Z. 1978: Próba statystycznego opisu empirycznych rozkładów niektórych cech mechanicznych pszenicy. *Rocz. Nauk Roln.* 2, C, 73, 4, 17-25.
- [19] Gaska R., Ślipek Z. 1978: Metoda wirówkowa badania siły wiążącej ziarno w kłosie. *Rocz. Nauk Roln.* 2, S.C. 72, 133-138.
- [20] Gieroba J., Dreszer K. 1995: Wybrane zagadnienia procesu wydzielania ziarna z masy zbożowej. *Probl. Inż. Roln.* 1, 17-24.
- [21] Gieroba J., Dreszer K. 1989: Opredielenje parametrov kowierno-rotornych separatorow grubogo worocha. Sbornik naucznych trudow. Techniczeskije sredstva dla obesieczienija intensywnych technologii wozdzieljwanija i uborki sielskochozjajstwiennych kultur. 100-106. *Trudy MISP* im. W.P. Goriaczkina, Moskwa.
- [22] Gieroba J., Malicki A. 1978: Elementy teorii omlotu w szczelinie stożkowego zespołu młócającego. *Rocz. Nauk Roln.*, C-1, t. 73, Wyd. PAN, Warszawa, s. 53-67.
- [23] Goriaczkin W.W. 1965: Sobranija soczinienij. T. 3, *Izdat. Kolos*, Moskwa.
- [24] Haman J. 1983: Czy dalszy rozwój konstrukcji maszyn rolniczych jest możliwy? *Masz. i Ciagn. Roln.*, nr 1, s. 7-9.
- [25] Huynh V.M., Powell T., Siddall J.N. 1982: Threshing and separating Process-A Mathematical Model. *Trans. ASAE*, 25, 1, s. 65-73.
- [26] Jegorowa T. 1956: Wozbuzdijenije kolebanij w potokie stieblej pri obmołotie. *Trudy WIM*, t. 35, Moskwa.
- [27] Kanafojski Cz. 1980: Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych, t. 2, cz. I, PWRiL, Warszawa.
- [28] Kendall D.G. 1956: Deterministic and stochastic epidemics in closed populations. Proceeding of the Third Berkley Symposium on Mathematical Statistic and Probability vol. IV, ISR, Berkeley and Los Angeles, s. 149-165.
- [29] Kęska W. 1992: Proces omlotu zbóż. *Rozprawy naukowe nr 262*, Wyd. Politechniki Poznańskiej.
- [30] Kęska W. 1985: Próba matematycznego opisu ruchu masy zbożowej w szczelinach roboczych zespołów

- młócących. III Symposium pt.: Problemy budowy oraz eksploatacji maszyn i urządzeń rolniczych, 107-109, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Płock.
- [31] Kołganow K.G., Kadancew P.M. 1967: Wydzielenie ziarna iż sołomy rotacyjnym separatorom. *Trudy Cz. I MiESCh*. 35, Czelabińsk, s. 67-70.
- [32] Kornacki A. 2005: Modelowanie procesu omlotu i separacji ziarna w wielobębnowym zespole młócaço-wydzielającym. Ser. Wyd. – *Rozprawy Naukowe Akademii Rolniczej*, z. 293, Lublin.
- [33] Kośmicki Z., Hetmański M., Kęska W. 1981: Separacja ziarna i możliwości jej poprawienia w obrębie bezklepiskowych zespołów młócących. *Masz. i Ciagn. Roln.*, 6, 10-12.
- [34] Kośmicki Z., Feder S., Hetmański M., Kęska W. 1985: Zespoły młócaço-separujące kombajnów zbożowych. III Symposium pt.: Problemy budowy oraz eksploatacji maszyn i urządzeń rolniczych, 119-122, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Płock.
- [35] Kutzbach H.D., Kusterman M. 1985: Elasticitaestmodul, Kompressibilitaet Scheber und Weiter Mechanische Eigenschaften von Kornfruchten. *Grundlag. Landtech.* 2, 152-157.
- [36] Kutzbach H.D. 2001: Mähdrescher-Reinigungsanlage. *Landtechnik* 56, 392-393.
- [37] Lalor W.F., Buchele W.F. 1963: Designing and Testing of a Threshing Cone. *Trans. ASAE*, 2, Michigan, s. 73-76.
- [38] Lalaor W.F., Buchele W.F. 1963: The Theory of Threshing Cone Desing. *J. Agric. Engng. Res.*, 1, s. 35-40.
- [39] Lee R. 1981: Straw-walkers left behind in race for output. *Agric. Mech. J.*, 11, 22-25.
- [40] Letoszniew M. 1956: Maszyny rolnicze. Wyd. PWRiL, Warszawa.
- [41] Lipkowicz E.I. 1971: Analityczeskije osnovy isledowanija processa obmołota i separacji ziarna mołotilnym aparatom ziernouborocznowo kombajna. *Ziemedelcz. Mech.*, 13, 225-236. Moskwa.
- [42] Miłósz T. 2000: Zespoły młócaço-wydzielające i czyszczące w kombajnach do zbioru zbóż. IBMER, Warszawa.
- [43] Miu P. 2000: Mathematische Modellirung der Dresch und Trennprozesse in Axialdreschwerken. *Landtechnik* 55, 86-87.
- [44] Myśliwcew W.N. 1985: Obosnowanije parametrov i pokazatielej roboty aksialno-rotornogo mołotilno-separirujuszczego ustrojstwa. (Rozprawa doktorska wyk. Pod kier. prof. N.I. Klenina, IISP im. Goriaczkina), Moskwa.
- [45] Nyborg E.O., McColly H.F., Hinkle R.T. 1968: Grain combine loss characteristics. *Trans. ASAE*, 1, 2, s. 727-732.
- [46] Pustygin M.A. 1948: Teoryja i technologiceskij rascet mołotilnych ustrojstw. Moskwa.
- [47] Reznicek R. 1971: Minimum Energy Required for Rekase of Grain from Ear. *J. Agricult. Eng. Res.*, 4, 337-342.
- [48] Roszkowski A., Soros I. 1990: Obrywające zespoły żniwne. *Masz. i Ciagn. Roln.*, 7/8, 13-15.
- [49] Seryj G.F. 1986: Ziernouborocznyje kombajny. Moskwa, Agropromizdat.
- [50] Tarkowski C., Szot B., Tys J. 1979: Variability of the grain to ear binding force for different forms of triticales. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 203, 99-105.
- [51] Tkaczenko W.A. 1967: Rezultaty issledowanija mołotilno-separarijuszczego ustrojstwa s centrobieżno-rotornym sołomotriasom. *Trudy CzIM i ESCH*, 35, 58-60.
- [52] Wieneke F., Caspers L. 1969: Einfluss der Zufuhrgeschwindigkeit der trommelumfangs-geschwindigkeit, der Spottweite und des Grungutanteils auf den Dreschvorgang bei werschiedenen Getraidearten. *Grundlag. Lantech.*, 1, 30-31.
- [53] Voß L. Bauch H. 2001: 30 Jahre Entwicklung Schlagleistendreschwerk. *Landtechnik* 56, 456-457.
- [54] Zadnieprowski R.P. 1966. Niekotoryje woprosy issledowanija obmołóta ziernowych kultur mnogogrannyimi walcami. *Ziemedelcz. Mech.*, t. 9.