

Wpłynęło 28.11.2012 r.
Zrecenzowano 08.01.2013 r.
Zaakceptowano 08.03.2013 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

Model matematyczny opisujący całkowitą energię procesu przygotowania płatków przeznaczonych na paszę

Oleg CHIGAREV^{ABCDEF}

*Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Mazowiecki Ośrodek
Badawczy w Kłudzienku*

Streszczenie

W artykule przedstawiono model matematyczny, za pomocą którego można porównać nakłady energetyczne dwóch technologii przygotowania śruty paszowej. Pierwsza technologia, stosowana obecnie, polega na suszeniu i zgniataniu ziarna, w drugiej zaś, proponowanej przez autora, najpierw zachodzi proces zgniatania ziarna, a potem jego suszenia. Opracowanie zawiera modele matematyczne, określające energię zgniatania ziarna. Ze zgniataniem mamy do czynienia, gdy na materiał działają zbliżające się do siebie powierzchnie. Są to najczęściej dwie powierzchnie równoległe lub dwie obracające się powierzchnie sferyczne, tworzące walce. W pracy opisano energię zgniatania w obu przypadkach. Z przeprowadzonej analizy modelu wynika, że stosowanie proponowanej przez autora technologii umożliwi zmniejszenie nakładów energii oraz skrócenie czasu suszenia.

Słowa kluczowe: energia, model matematyczny, suszenie, zgniatanie

Wstęp

Od pewnego czasu obserwuje się ciągły wzrost cen paliw, w konsekwencji czego zwiększają się także koszty produkcji rolniczej. W rezultacie następuje również wzrost cen pasz, w tym także przemysłowych, przeznaczonych dla zwierząt. W klasycznej, stosowanej obecnie, technologii przygotowania śruty zbożowej, bezpośrednio po zbiorze kombajnem, jeśli wilgotność względna ziarna przekracza 14,5%, jest ono przed magazynowaniem, a więc i przed dalszym przetwórstwem, suszone. Suszenie nasion jest niezbędne do ich długotrwałego składowania.



W technologii przetwarzania ziarna przeznaczonego na paszę, największe nakłady energii są ponoszone na suszenie, a następnie na rozdrabnianie, nie wiadomo jednak jakie dokładnie są proporcje energii wydatkowanej na te procesy technologiczne. W tych dwóch podstawowych procesach należy szukać możliwości zmniejszenia energochłonności całego technologicznego ciągu zgniatania ziarna zbóż do postaci płatków.

Tematyką suszenia i rozdrabniania ziarna zajmowali się m.in.: BIRTA i in. [2009], MIESZKAŁSKI [2009], ROMAŃSKI [2004], ŁYSIAK i LASKOWSKI [1999], STRUMIŁO [1983], PABIS [1982] oraz SZYŁO i WOROBJOW [2007].

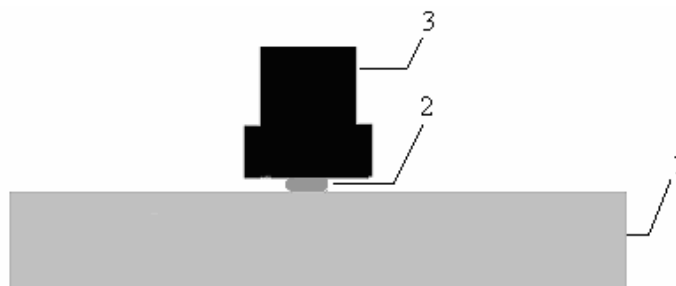
Cel pracy

Celem pracy było określenie, za pomocą modelu matematycznego, który wariant procesu przygotowania płatków jest korzystniejszy ze względu na energochłonność: najpierw suszenie ziarna, a później jego zgniatanie czy odwrotnie.

Urządzenia stosowane w badaniach

Maszyna wytrzymałościowa Instron 5566

Do określenia energochłonności zgniatania ziarna pszenicy stosowano maszynę wytrzymałościową Instron 5566 (rys. 1), o zakresie pomiaru siły od 1 N do 1 kN, z dokładnością do 1 N. Prędkość przemieszczania się głowicy podczas zgniatania wynosiła $2,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Grubość płatków ziarna po zgnieceniu wynosiła 0,4 mm. Do rejestracji wyników stosowano program Merlin. W badaniach wykorzystano pszenicę następujących odmian: Zyta, Mułan, Dekan, Tanacja, Korweta.



Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 1. Maszyna wytrzymałościowa Instron 5566; 1 – płyta dolna, 2 – ziarno, 3 – głowica robocza

Fig. 1. Testing machine Instron 5566; 1 – bottom plate, 2 – working head, 3 – crushed grain

Suszarka laboratoryjna Zwick/Roell

Ziarno suszono w suszarce laboratoryjnej marki Zwick/Roell (rys. 2), wyposażonej w zespół grzejny o mocy 1,6 kW. Suszarka miała komorę temperaturową z wewnętrznym obiegiem czynnika suszącego. Maksymalna temperatura suszenia wynosiła 130°C. Komora temperaturowa umożliwiała utrzymanie stabilnej temperatury suszenia. Podczas badań stosowano temperaturę czynnika suszącego w zakresie od 60 do 75°C i prędkość przepływu powietrza ok. 1,5 m·s⁻¹. Parametry te przyjęto jako optymalne, wyznaczone podczas dotychczasowych wielu badań procesu suszenia ziarna zbóż [PABIS 1982; MARKS 2007]. Masa pobieranych próbek wynosiła 200 g. Próbki umieszczano w koszyku o średnicy 200 mm i ważono co 5 minut. Do pomiaru prędkości przepływu powietrza zastosowano anemometr AW 139.



Rys. 2. Suszarka laboratoryjna Zwick/Roell
Fig. 2. Laboratory dryer Zwick/Roell

Źródło: www.zwick.pl Source: www.zwick.pl

Metody i wyniki badań

Model opisujący nakłady energetyczne na proces przygotowania płatków składa się z dwóch podstawowych członów – nakładów na suszenie oraz nakładów na zgniatanie [ZAWIŚLAK 2006]:

$$E_c = E_s + E_{zg} \quad (1)$$

gdzie:

E_c – całkowite nakłady energetyczne na przygotowanie płatków [kJ];

E_s – nakłady energetyczne na suszenie ziarna [kJ];

E_{zg} – nakłady energetyczne na zgniatanie ziarna [kJ].

Nakłady energetyczne na suszenie ziarna obliczano ze wzoru:

$$E_s = N \cdot t_s \cdot e \quad (2)$$

gdzie:

N – moc grzejna urządzenia suszącego [kW];

t_s – czas suszenia [h];

e – współczynnik efektywnej pracy grzałek (czas pracy/czas przestoju).

Nakłady energetyczne na zgniatanie obliczamy ze wzoru:

$$E_{zg} = A_{spr} + A_n \quad (3)$$

gdzie:

$A_{spr} = P_{zg0} \cdot \Delta h_0$ – praca początkowego, sprężystego etapu zgniatania [kJ];

P_{zg0} – siła pierwszego, sprężystego etapu zgniatania ziarna [kN];

$A_n = P_{zg} \cdot \Delta h_1$ – praca drugiego, sprężysto-lepkiego etapu zgniatania [kJ];

P_{zg} – siła drugiego, sprężysto-lepkiego etapu zgniatania [kN];

$\Delta h_0 = \Delta h - \Delta h_1$ – odkształcenie początkowego sprężystego etapu zgniatania [mm];

Δh_1 – odkształcenie sprężysto-lepkiego etapu zgniatania ziarna [mm];

Δh – całkowite odkształcenie ziarna podczas zgniatania [mm].

Z badań ROMAŃSKIEGO [2004] i CHIGAREVA [2010] wynika, że praca sił sprężystych jest na tyle mała (Δh_0 jest bardzo małe), że możemy ją pominąć, czyli $P_{zg0} \cdot \Delta h_0 = 0$.

W pracy omówiono dwa warianty technologii przygotowania paszy z ziarna zbóż w postaci płatków. W obu wariantach stosowano zgniatanie ziarna w maszynie wytrzymałościowej Instron oraz w gniotowniku walcowym.

W pierwszym wariacie wilgotne ziarno najpierw poddano zgniataniu, a dopiero później suszeniu. Wzór na całkowite nakłady energetyczne w tej technologii przyjmuje postać:

$$E_{c1} = E_{zg1} + N \cdot t_{s1} \cdot e \quad (4)$$

gdzie:

$E_{zg1} = P_{zg1} \cdot \Delta h$ [kJ];

P_{zg1} – siła zgniatania w pierwszym wariacie technologii [kN];

Δh – odkształcenie ziarna [m].

W drugim wariacie technologii, stosowanym obecnie, ziarno zostało najpierw wysuszone, a następnie poddane procesowi zgniatania. Całkowite nakłady energetyczne wynoszą:

$$E_{c2} = N \cdot t_{s2} \cdot e + E_{zg2} \quad (5)$$

gdzie:

$$E_{zg2} = P_{zg2} \cdot \Delta h \text{ [kJ];}$$

P_{zg2} – siła zgniatania w drugim wariancie technologii [kN];

Δh – odkształcenie ziarna [m].

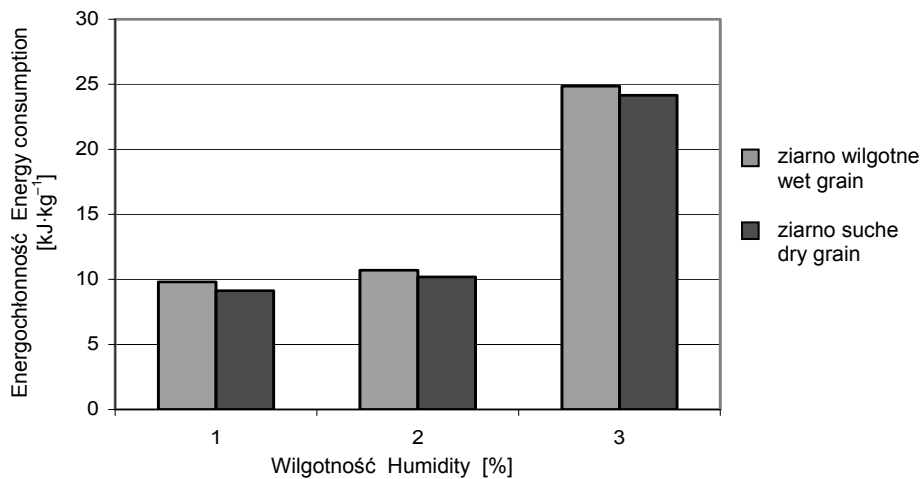
Z danych zaprezentowanych w tabeli 1. i na rysunku 3. wynika, że energochłonność zgniatania ziarna wilgotnego jest większa od energochłonności zgniatania ziarna suchego, czyli $P_{zg1} > P_{zg2}$.

Tabela 1. Energochłonność zgniatania do grubości 0,4 mm ziarna różnych odmian pszenicy o różnej wilgotności i o wilgotności 11%

Table 1. Energy consumption for crushing to a thickness of 0.4 mm of grain of different wheat varieties characterized by different humidity and humidity of 11% as well

Wilgotność Humidity [%]	Energochłonność zgniatania pszenicy Energy consumption for wheat crushing [kJ·kg ⁻¹]		
	Mułan	Tanacja	Zyta
15,3	9,8	–	–
16,4	–	10,71	–
18,2	–	–	24,86
11,0	9,12	10,18	24,15

Źródło: wyniki własne. Source: own study.



Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 3. Energochłonność zgniatania wilgotnego i suchego ziarna różnych odmian pszenicy (poziom zgniotu 0,4 mm)

Fig. 3. Energy consumption for crushing wet and dry wheat grain of different varieties (level of crushing 0.4 mm)

Wychodząc z założenia, że suszenie ziarna zgniecionego jest mniej energochłonne, możemy przyjąć, że całkowite nakłady energetyczne w pierwszym wariantie technologii sporządzania płatków są mniejsze lub równe całkowitym nakładom energetycznym w wariantie drugim tej technologii. Zależność tę możemy przedstawić następująco:

$$E_{c1} \leq E_{c2} \quad (6)$$

$$E_{zg1} + N \cdot t_{s1} \cdot e \leq E_{zg2} + N \cdot t_{s2} \cdot e$$

$$P_{zg1} \Delta h + N \cdot t_{s1} \cdot e \leq P_{zg2} \Delta h + N \cdot t_{s2} \cdot e$$

$$P_{zg1} \Delta h - P_{zg2} \Delta h \leq N \cdot t_{s2} \cdot e - N \cdot t_{s1} \cdot e$$

$$\Delta h (P_{zg1} - P_{zg2}) \leq Ne(t_{s2} - t_{s1})$$

Ponieważ $t_{s2} - t_{s1} > 0$ i $P_{zg1} - P_{zg2} > 0$, zależność (6) przyjmuje następującą postać:

$$0 < \frac{\Delta h}{Ne(t_{s2} - t_{s1})} \leq \frac{1}{P_{zg1} - P_{zg2}} \quad (7)$$

Przyjmując, że $P_{zg1} - P_{zg2} = \Delta P$, a $t_{s2} - t_{s1} = \Delta t_s$, zależność (7) możemy przekształcić do postaci:

$$\Delta t_s = \frac{\Delta h \Delta P}{Ne} \quad (8)$$

Rozpatrzmy przypadek zgniatania i suszenia pojedynczego ziarna. Przyjmując $N = 1,6$ kW, $e = 0,32$, $\Delta h = 0,0026$ mm oraz znając z pomiarów ΔP możemy obliczyć Δt_s . Wyniki obliczeń dla ziarna pszenicy odmiany Korweta zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości różnicy siły zgniatania ΔP i czasu suszenia Δt_s ziarna pszenicy odmiany Korweta

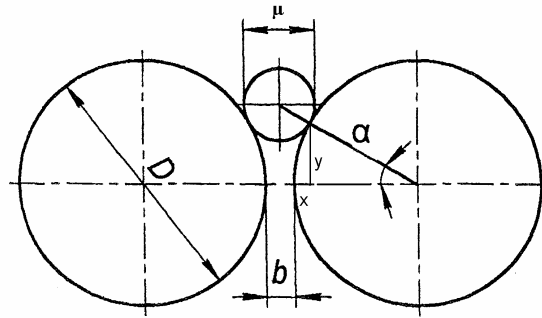
Table 2. Dependence between ΔP and Δt_s for tested seed Korweta variety

ΔP [N]	Δt_s [s]
150	0,7617
250	1,2695
350	1,7773
450	2,2851
650	3,3007

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Ze wzoru (8) oraz tabeli 2. wynika, że ze wzrostem parametru ΔP wzrastają wartości różnicy między czasem suszenia ziarna całego i zgniecionego.

Przypadek zgniatania ziarna w gniotowniku przedstawiono schematycznie na rysunku 4.



Źródło: ROMAŃSKI [2003]. Source: ROMAŃSKI [2003].

Rys. 4. Układ walców gniotownika i ustawienie ziarna; b – szczelina robocza, μ – grubość ziarna, α – kąt styku powierzchni ziarna z powierzchnią walca, D – średnica walców

Fig. 4. System of the crushing mill rollers and grain positioning; b – working gap, μ – thickness of grain, α – contact angle of grain surface and roller surface, D – rollers diameter

Przypadek ten również rozpatrujemy, zakładając że całkowite nakłady energetyczne w pierwszym wariantcie technologii są mniejsze lub równe nakładom energetycznym w wariantcie drugim. Zależność tę zapisujemy następująco:

$$E_{c1} \leq E_{c2} \quad (9)$$

$$E_{zg1} + E_{s1} \leq E_{s2} + E_{zg2}$$

$$E_{zg1} + N \cdot t_{s1} \cdot e \leq N \cdot t_{s2} \cdot e + E_{zg2}$$

Przekształcając zależność (9) otrzymujemy następującą postać zapisu nierówności:

$$\frac{(E_{zg1} - E_{zg2})}{N \cdot e} \leq t_{s2} - t_{s1} \quad (10)$$

Rozpatrzmy skrajny przypadek, kiedy lewa część wyrażenia (10) równa się prawej, czyli:

$$\frac{(E_{zg1} - E_{zg2})}{N \cdot e} = t_{s2} - t_{s1} \quad (11)$$

Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych wynika, że suszenie ziarna całego trwa od 1,5 do 3 razy dłużej niż suszenie ziarna zgniecionego, więc możemy zapisać, że $t_{s2} > t_{s1}$, czyli $t_{s2} - t_{s1} > 0$, a więc $E_{zg1} > E_{zg2}$. W przypadku zgniatania

ziarna w gniotowniku możemy następująco zapisać nakłady energetyczne zgniatania E_{zg1} i E_{zg2} , gdzie M_k to moment obrotowy walca [CHIGAREV 2010]:

$$E_{zg1} = (M_{k1} + P_{z1}r)\alpha_1 \quad (12)$$

$$E_{zg2} = (M_{k2} + P_{z2}r)\alpha_2 \quad (13)$$

Ze względu na to, że $\alpha_1 = \alpha_2$ i $M_{k1} = M_{k2}$, to aby była spełniona nierówność $E_{zg1} - E_{zg2} > 0$, niezbędny jest warunek: $E_{zg1} > E_{zg2}$.

Warunek ten będzie spełniony, gdy będzie spełniona nierówność:

$$P_{z1} > P_{z2} \quad (14)$$

Podsumowanie

W opracowaniu przedstawiono matematyczny model, opisujący całkowite nakłady energetyczne na płatkowanie ziarna podczas przygotowania paszy w dwóch różnych wariantach procesów („zgniatanie – suszenie” i „suszenie – zgniatanie”). Z analizy modelu wynika, że czas suszenia ziarna w wariacie „suszenie – zgniatanie” jest większy niż w wariacie „zgniatanie – suszenie”. Z analizy opracowanego modelu matematycznego, opisującego proces zgniatania i suszenia ziarna zbóż wynika, że ze względu na oszczędności energii lepiej jest suszyć ziarno zgniecione. Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych wymagają potwierdzenia badaniami eksploatacyjnymi.

Bibliografia

- BIRTA V.S.P., WOMAC A.R., CHEVANAN N., MIU P., IGATHINATHANE C. 2009. Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions. *Powder Technology*. Vol. 193 s. 32–45.
- CHIGAREV O. 2010. Model matematyczny procesu deformacji ziarna przy jego zgniataniu. *Bioagrotechnical Systems Engineering*. Vol. 6 s. 13–19.
- ŁYSIAK G., LASKOWSKI J. 1999. Analiza energochłonności rozdrabniania ziarna zbóż i nasion roślin strączkowych. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 5 s. 187–192.
- MIESZKALSKI L. 2011. Stan badań i rozwiązań konstrukcyjnych w zakresie obłuskiwania i rozdrabniania ziarna zbóż na potrzeby przemysłu paszowego i spożywczego. Ekspertyza, projekt „Agroinżynieria gospodarce” [online]. [Dostęp 15.02.2013]. Dostępny w Internecie: www.agengpol.pl
- PABIS S. 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych. Warszawa. PWRiL. ISBN 83-09-00597-0 ss. 228.
- ROMAŃSKI L. 2003. Nowa metoda badania energochłonności dynamicznego zgniatania ziarna pomiędzy walcami. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 8 s. 359–365.
- ROMAŃSKI L. 2004. Analiza i modelowanie procesu zgniatania ziarna pszenicy. *Zeszyty Naukowe AR Wrocław*. Nr 494. *Rozprawy CCXX*. ISSN 0867-7964; 0867-1427, ss. 108.

STRUMIŁO CZ. 1983. Podstawy teorii i techniki suszenia. Warszawa. WNT. ISBN 83-204-0418-5 ss. 473.

ŠYLO I., VOROB'EV N. 2007. Sovremennye techničeskie sredstva dlja pljuščenija zerna. Agropanorama. Nr 4 s. 6–10.

ZAWIŚLAK K. 2006. Przetwarzanie ziarna kukurydzy na cele paszowe. Akademia Rolnicza w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji. Rozprawy Naukowe. Z. 304. ISSN 0860-4355 ss. 95.

Oleg Chigarev

**MATHEMATICA MODEL OF ENERGY CONSUMPTION
FOR FODDER PREPARATION PROCESS**

Summary

In article mathematical model comparing two technologies of fodder preparation is presented. First technology, drying – crushing, is used presently, second one – crushing – drying, is suggested by the author. Results of research indicate that technology suggested by the author reduces energy consumption and shortens the time of drying.

Key words: energy, mathematical model, drying, crushing

Adres do korespondencji

dr inż. Oleg Chigarev

Instytut Technologiczno-Przyrodniczy

Mazowiecki Ośrodek Badawczy w Kłudzienku

07-825 Grodzisk Mazowiecki

tel.: 22 755-50-42; email: o.chigarev@itep.edu.pl; olo8327@rambler.ru

