

AUTOMATYCZNA IDENTYFIKACJA ZAKOŃCZENIA PROCESU SUSZENIA ZIARNA PSZENICY W GRUBEJ NIERUCHOMEJ WARSTWIE

Antoni Ryniecki, Marzena Gawrysiak-Witulska

Instytut Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego,
Akademia Rolnicza im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu

Wstęp

Większość rocznej produkcji zbóż w Polsce (około 66%) pozostaje w gospodarstwach z przeznaczeniem na pasze lub wysiew [KISIEL i in. 1996]. Literatura podaje różne sposoby późniejszej konserwacji ziarna składowanego w gospodarstwach producentów. W klimacie Polski ziarno złożone do magazynu silosowego lub płaskiego, wyposażonego w odpowiednio dobrany wentylator, nagrzewnicę powietrza i urządzenie pomiarowo-kontrolne, można wysuszyć do bezpiecznej wilgotności metodą niskotemperaturową w grubej nieruchomej warstwie, a następnie schłodzić powietrzem atmosferycznym doprowadzając cały ekosystem masy składowanego ziarna do stanu anabiozy [RYNIECKI 1985; KALETĄ 1996; RYNIECKI, SZYMAŃSKI (red.) 2002].

Urządzenia pomiarowo-kontrolne nadzorujące procesy konserwacji ziarna w miejscu składowania nie posiadają możliwości automatycznej identyfikacji zakończenia suszenia [RYNIECKI, SZYMAŃSKI (red.) 2002]. Dlatego użytkownik w czasie suszenia musi obserwować zmiany wilgotności ziarna w warstwie wylotowej powietrza, periodycznie dokonując pomiarów miernikiem wilgotności ziarna. Po stwierdzeniu obniżenia się wilgotności ziarna do bezpiecznej granicy ręcznie przelacza urządzenie pomiarowo-kontrolne z trybu pracy „suszenie” na „chłodzenie”.

W literaturze przedmiotu brak jest informacji na temat automatycznej identyfikacji zakończenia suszenia ziarna metodą niskotemperaturową. W przeprowadzonych przez autorów wcześniejszych badaniach [GAWRYSIĄK-WITULSKA, RYNIECKI 2001] stwierdzono, że wysokie korelacje między zmianami wilgotności względnej powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych a zmianami zawartości wody w ziarnie w warstwach na wylocie powietrza suszącego mogą być wykorzystane do automatycznej identyfikacji frontu suszenia, co stało się podstawą do sformułowania celu tej pracy.

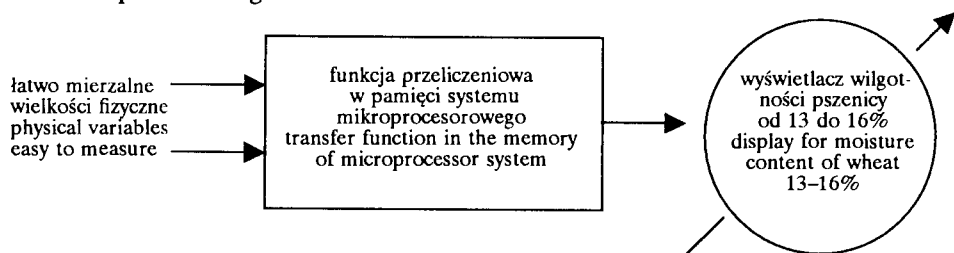
Cel i zakres pracy

Celem badań jest potwierdzenie założenia badawczego o możliwości automatycznej identyfikacji zakończenia niskotemperaturowego suszenia ziarna psze-

nicy w grubej nieruchomej warstwie na podstawie informacji z czujników łatwo mierzalnych wielkości fizycznych. Wymieniona identyfikacja powinna umożliwić zbudowanie urządzenia pomiarowego – wskaźnika zakończenia suszenia pszenicy.

Metoda

Schemat ideowy identyfikacji zakończenia suszenia pszenicy przedstawiono na rys. 1. Jako łatwo mierzalne wielkości fizyczne, umożliwiające wyznaczenie wilgotności ziarna, wybrano temperaturę i wilgotność względną powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych w warstwie wylotowej dla powietrza suszącego. Odpowiednie sondy do pomiaru tych wielkości stosowane są powszechnie do kontroli wdmuchiwanego do warstwy ziarna powietrza w metodzie suszenia niskotemperaturowego.



Rys. 1. Schemat ideowy identyfikacji zakończenia niskotemperaturowego procesu suszenia pszenicy w grubej nieruchomej warstwie; zakończenie suszenia przy wilgotności 14,5% w warstwie wylotowej dla powietrza suszącego

Fig. 1. Block diagram representation of an automatic identification of the end of near-ambient wheat drying in deep bed; moisture content of the outlet layer lower than 14.5 (% w.b.). means the end of drying

Do sformułowania funkcji przeliczeniowej wykorzystano równania desorpcji Hendersona i Chunga [PFOST i in. 1976], zalecane przez normy amerykańskie [ASAE STANDARDS 1991, 2000] do wyznaczania wilgotności równowagowej ziarna pszenicy. W suszeniu niskotemperaturowym w warstwie wylotowej powietrza występują niewielkie różnice między wilgotnością względną a wilgotnością równowagową powietrza suszącego [NELLIST 1998]. Do badań wprowadzono następujące założenie upraszczające: istnieje stała różnica między rzeczywistą zawartością wody w ziarnie w warstwie wylotowej powietrza a zawartością wody obliczoną z równań równowagi suszarniczej z użyciem aktualnych wartości wilgotności względnej i temperatury powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych w końcowej fazie suszenia niskotemperaturowego. Aby uwzględnić tę różnicę do równań równowagi suszarniczej wprowadzono dodatkowe stałe, uzyskując następujące zmodyfikowane zależności:

a) Hendersona:

$$u_H = \frac{\ln\left(1 - \frac{\Phi_w}{100}\right)}{-1,2299 \cdot 10^{-5}(t_w + 64,346)} \cdot \frac{1}{2,5558} + b_H, \quad (1)$$

b) Chunga:

$$u_{Ch} = 0,27908 - 0,04236 \cdot \ln \left[-(t_w + 35,662) \cdot \ln \left(\frac{\varphi_w}{100} \right) \right] + b_{Ch}, \quad (2)$$

gdzie: φ_w , t_w wilgotność względna (%) i temperatura (°C) powietrza mierzone w warstwie ziarna wylotowej dla powietrza suszącego.

Wartości stałych b_H i b_{Ch} wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów przez dopasowanie krzywych suszenia, uzyskanych na drodze obliczeń wg równań (1) lub (2) do krzywych suszenia uzyskanych w serii doświadczeń naturalnych na stanowisku badawczym. Poszukiwano takich wartości b_H i b_{Ch} , które minimalizowały funkcję celu E , określoną jako suma kwadratów różnic między zawartościami wody uzyskanymi z obliczeń i z eksperymentu:

$$E = \sum_{i=1}^n [u_{obl.}(t_i, \varphi_i) - u_i]^2, \quad (3)$$

gdzie:

- E – funkcja celu,
- $u_{obl.}$ – zawartość wody obliczona wg zmodyfikowanego równania Hendersona lub Chunga,
- u_i – zawartość wody w chwili τ_i , określona w doświadczeniu naturalnym dla warstwy ziarna wylotowej dla powietrza suszącego,
- n – liczba pomiarów zawartości wody w ziarnie na stanowisku badawczym.

Dopasowanie przeprowadzono przy wykorzystaniu programu SigmaPlot (Jandel Scientific, v. 1,02 dla Windows).

Materiał i procedury doświadczalne

Niskotemperaturowe procesy suszenia ziarna w grubej nieruchomej warstwie prowadzono w specjalnie skonstruowanym i zbudowanym stanowisku badawczym [GAWRYŚIAK-WITULSKA, RYNIĘCKI 2001]. Temperaturę i wilgotność względną powietrza mierzono z dokładnością odpowiednio $\pm 0,5^\circ\text{C}$ i $\pm 2,0\%$. Prędkość powietrza przepływającego przez masę ziarna mierzono na wylocie z komory suszenia anemometrem o dokładności $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Materiał doświadczalny stanowiło ziarno pszenicy ozimej, odmiany 'Sakwa' o wilgotności 12–14%, pochodzące ze zbiorów w latach 2000 i 2001 Gospodarstwa Doświadczalnego w Żłotnikach, należącego do Akademii Rolniczej w Poznaniu. Pszenicę przed doświadczeniem sztucznie nawilżano, aby nadać jej cechy ziarna wilgotnego. W tym celu ziarno zraszano wodą o określonej masie i pozostawiano w pomieszczeniu o temperaturze 8°C na okres 24 godz. Po tym zabiegu wilgotność ziarna w różnych doświadczeniach wynosiła od 17 do 18%. Wilgotność materiału badawczego oznaczano za

pomocą wagosuszarki „Sartorius MA 30”. Wagosuszarke sprawdzano metodą odniesienia wg PN-91/A-74010. Wilgotność pszenicy w poszczególnych warstwach w czasie suszenia obliczano z bilansu masowego na podstawie ubytków masy rejestrowanych za pomocą wagi elektronicznej „AXIS B 10”, o dokładności 1 g.

Dwa niskotemperaturowe procesy suszenia ziarna prowadzono w warstwie o łącznej grubości 1,2 m. Pozorna liniowa prędkość przepływu powietrza przez suszoną warstwę ziarna we wszystkich doświadczeniach była jednakowa i wynosiła 0,146 (m·s⁻¹). Wilgotność względna i temperatura powietrza zasysanego przez wentylator zmieniały się w sposób przypadkowy tak, jak w typowym procesie suszenia niskotemperaturowego. Aby nie dopuścić do nawilżenia ziarna zastosowano najprostszы elektroniczny humidostat sterujący podgrzewaczem powietrza, który czuwał, by wilgotność względna powietrza wdmuchiwanego do masy ziarna nie przekraczała wartości 55%. W trakcie trwania procesów suszenia co 10 min rejestrowano temperaturę i wilgotność względną powietrza suszącego oraz powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych dwóch warstw ziarna wylotowych dla powietrza suszącego (o grubości 1,05 m i 1,15 m). Co 8 godzin ważono segmenty komory suszenia o grubości warstwy ziarna 0,1 m w celu określenia zmian wilgotności ziarna. Otrzymane wyniki stanowiły podstawę do realizacji postawionego na wstępie celu pracy.

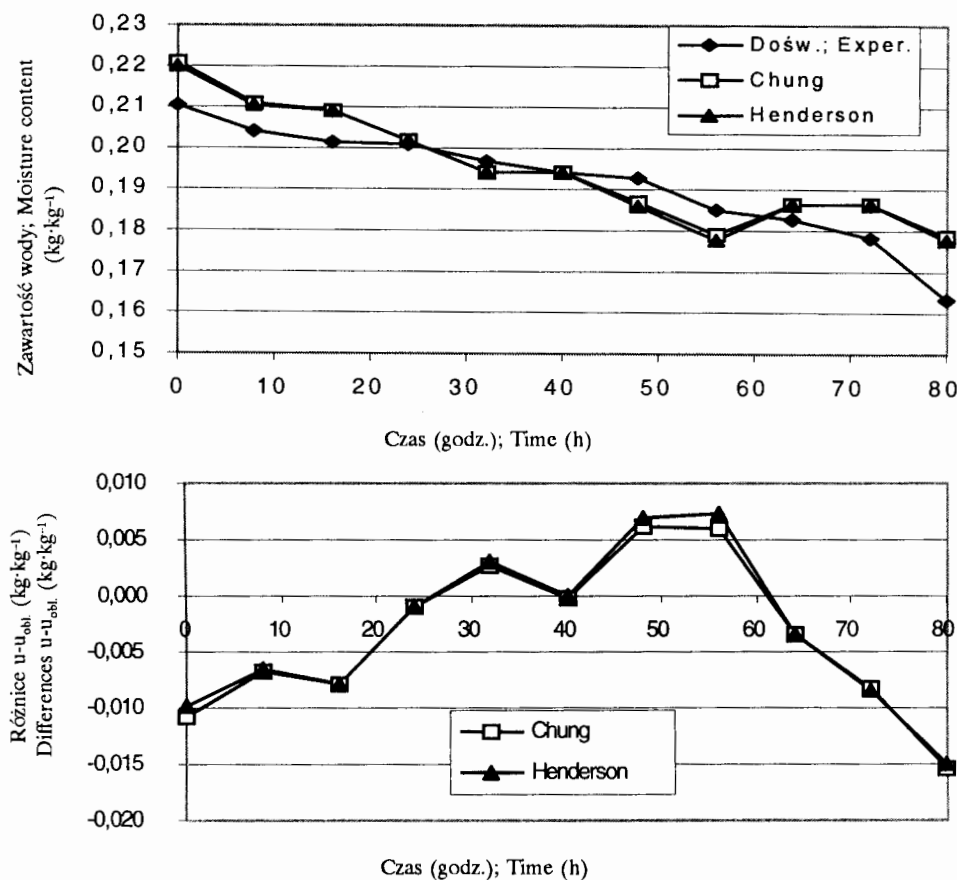
Wyniki i dyskusja

W celu wyznaczenia stałych b_H i b_{Ch} , występujących w zmodyfikowanych równaniach Hendersona i Chunga, przeprowadzono dwa doświadczenia naturalne na stanowisku badawczym opisanym wcześniej. Parametry wlotowe powietrza suszącego zmieniają się w sposób stochastyczny [RYNIECKI 1992]. W tabeli 1 podano ich podstawową charakterystykę statystyczną. Wilgotność względną i temperaturę powietrza w interesującej nas warstwie ziarna na wylocie powietrza suszącego użyto do przewidywania zmian zawartości wody za pomocą zmodyfikowanych równań Hendersona i Chunga. Stałe b_H i b_{Ch} , występujące w tych równaniach, wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów dla każdego doświadczenia naturalnego oddzielnie, a następnie obliczono ich wartości średnie, które wynoszą: $b_H = 3,98$ i $b_{Ch} = 4,59$. Wartość średnią b_H wykorzystano do obliczeń zawartości wody $u_{obl.H}$ dla danych φ_w i t_w zmierzonych w obu przeprowadzonych eksperymentach. Podobnie obliczano $u_{obl.Ch}$, używając wartości średniej b_{Ch} dla obu doświadczeń.

Tabela 1; Table 1

Charakterystyka statystyczna parametrów powietrza suszącego
(pozorna prędkość przepływu powietrza przez warstwę ziarna wynosiła 0,146 m·s⁻¹)
Statistics of the drying air parameters (airflow through grain bed was 0.146 m·s⁻¹)

Doświadczenie Experiment	Temperatura; Temperature (°C)				Wilgotność względna; Relative humidity (%)			
	wartość średnia mean value	odchylenie standardowe standard deviation	min.	maks. max.	wartość średnia mean value	odchylenie standardowe standard deviation	min.	maks. max.
1	21,20	0,711	20,18	22,80	50	42	40	54
2	25,12	1,903	22,31	28,24	49	50	40	55



Rys. 2. Krzywe suszenia warstwy ziarna wylotowej dla powietrza suszącego, uzyskane z wyników doświadczenia nr 2; pomiarowe i przewidywane za pomocą zmodyfikowanych równań Hendersona ($u_{obl,H}$) i Chunga ($u_{obl,Ch}$); na dolnym wykresie przedstawiono różnice

Fig. 2. Comparison of measured and predicted drying curves for the outlet layer of grain (experiment 2); predicted drying curves were obtained using modified Henderson ($u_{obl,H}$) and Chung ($u_{obl,Ch}$) equations; on the bottom figure the differences are shown

Przewidywane zmiany zawartości wody porównano ze zmianami pomiarowymi uzyskanymi w eksperymentach naturalnych (tab. 2 i rys. 2). Wartości średnie różnic są niewielkie (co potwierdza poprawność użytego algorytmu metody najmniejszych kwadratów) i wynoszą odpowiednio dla doświadczeń 1 i 2: – dla zmodyfikowanego równania Hendersona 0,005 i –0,003 ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$), – dla zmodyfikowanego równania Chunga 0,004 i –0,004 ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Z punktu widzenia dokładności automatycznej identyfikacji zakończenia procesu suszenia pszenicy (zmniejszenia wilgotności do 14,5%) ważniejsze są spodziewane różnice maksymalne. Dla obu analizowanych funkcji przeliczeniowych są podobne – dla zmodyfikowanego równania Hendersona wynoszą odpowiednio dla doświadczenia 1 i 2: 0,027 i –0,015 ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$), zaś dla zmodyfikowanego równania Chunga 0,026 i –0,015 ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Przedstawione maksymalne różnice (od 1,6% do 1,8% w przeliczeniu

Tabela 2; Table 2

Pomiarowe i przewidywane zmiany zawartości wody w doświadczeniu nr 1; pomiarowe zawartości wody (u_i), wilgotność względna (φ_{wi}) oraz temperaturę (t_{wi}) określano i mierzono w warstwie wylotowej dla powietrza suszącego; przewidywane zawartości wody obliczono przy wykorzystaniu zmodyfikowanych równań Hendersona ($u_{obl.H}$) i Chunga ($u_{obl.Ch}$); wielkości oznaczone indeksem „i” określano co 8 godzin

Typical measured and predicted changes of grain moisture content (experiment 1); measured grain moisture content (u_i), air RH (φ_{wi}) and temperature (t_{wi}) were determined for the layer of grain that was the outlet of air; predicted moisture content was calculated using modified Henderson ($u_{obl.H}$) and Chung ($u_{obl.Ch}$) equations; parameters that have subscript „i” were determined or measured at 8 h interval

Pomiar i Measurement i	φ_{wi} (%)	t_{wi} (°C)	u_i (kg·kg ⁻¹)	$u_{obl.H}$ (kg·kg ⁻¹)	Różnica Difference $u_i - u_{obl.H}$	$u_{obl.Ch}$ (kg·kg ⁻¹)	Różnica Difference $u_i - u_{obl.Ch}$
1	62,7	15,9	0,216	0,189	0,0267	0,190	0,0258
2	61,5	16,9	0,201	0,187	0,0153	0,188	0,0143
3	59,3	16,7	0,197	0,183	0,0136	0,185	0,0123
4	58,0	19,1	0,183	0,180	0,0030	0,181	0,0018
5	57,3	19,6	0,180	0,178	0,0015	0,180	0,0002
6	56,5	19,1	0,173	0,178	-0,0047	0,179	-0,0062
7	54,8	19,9	0,169	0,175	-0,0056	0,176	-0,0073
8	49,1	18,1	0,158	0,167	-0,0094	0,171	-0,0126

na wilgotność ziarna w procentach), determinujące dokładność identyfikacji zakończenia suszenia są podobne do różnic, jakie obserwuje się w pomiarach przy wykorzystaniu testerów wilgotności ziarna zbóż, stosowanych w praktyce rolniczej. Średnie bezwzględne różnice są mniejsze i wynoszą od 0,43% do 0,70% wilgotności ziarna (dla zmodyfikowanego równania Chunga odpowiednio w doświadczeniu nr 2 i nr 1). Miary rozrzutu dla podanych wartości średnich – odchylenia standardowe wynoszą odpowiednio 0,31% i 0,56%. Podane różnice występowały w suszeniu ziarna od wilgotności 18% do 13,5%. Identyfikacja zakończenia procesu suszenia pszenicy dotyczy węższego zakresu wilgotności, na przykład 14,5% \pm 1,5%, to znaczy od 13% do 16%. Należy się spodziewać, że w tym węższym zakresie dokładność identyfikacji będzie lepsza. W celu poprawy dokładności, podobnie jak dla testerów wilgotności, można wprowadzić korektę proponowanej identyfikacji zakończenia suszenia. Polega ona na jednorazowym dokładnym określeniu wilgotności wybranej próbki ziarna, w porównaniu z wilgotnością zmierzoną i uwzględnianiu w dalszych pomiarach obliczonej różnicy.

Wnioski

1. Eksperymenty nad wyznaczeniem zawartości wody w ziarnie suszonym metodą niskotemperaturową przy wykorzystaniu zmodyfikowanych równań równowagi suszarniczej Hendersona i Chunga oraz wilgotności względnej i temperatury powietrza, mierzonych w warstwie wylotowej dla powietrza suszącego, potwierdziły założenie badawcze o możliwości automatycznej identyfikacji zakończenia procesu suszenia pszenicy w grubej nieruchomej warstwie.

2. Zmodyfikowane równanie Hendersona przewiduje zawartość wody w suszonej nieruchomej warstwie ziarna pszenicy o grubości 1,2 metra na wylocie powietrza, podobnie jak zmodyfikowane równanie Chunga. Średnie bezwzględne różnice między przewidywanymi i pomiarowymi zmianami wilgotności ziarna wahają się od 0,43% do 0,70%, a odchylenia standardowe od 0,31% do 0,56%.
3. Dokładność zaproponowanej metody identyfikacji zakończenia suszenia niskotemperaturowego jest wystarczająca do zastosowania praktycznego w późniejszej konserwacji pszenicy.

Oznaczenia ogólne

t	temperatura (°C),
u	zawartość wody w ziarnie, (kg·kg ⁻¹ s.m.),
φ	wilgotność względna powietrza (%),
τ	czas, (s, h).

Literatura

- ASAE STANDARDS 1991. *Moisture relationships of grains*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, USA: 363–367.
- ASAE STANDARDS 2000. *Moisture relationship of plant based agricultural products*. ASAE – The Society for Engineering in Agricultural, Food, and Biological Systems, St. Joseph, MI, USA: 508–524.
- GAWRYŚLAK-WITULSKA M., RYŃIECKI A. 2001. *Korelacje między wybranymi parametrami powietrza i ziarna pszenicy suszonej metodą niskotemperaturową w grubej nieruchomej warstwie*. Inżynieria Rolnicza 10(30): 135–143.
- KALETA A. 1996. *Modelowanie procesu konwekcyjnego suszenia ziarna w silosach*. Rozprawa habilitacyjna, Fundacja „Rozwój SGGW”, Warszawa: 137 ss.
- KISIEL J., URBAN R., BURAKIEWICZ J., JASIŃSKA J., BŁOK F., ZOUNER H. 1996. *Rynek zbóż*. Warszawa. Raporty Rynkowe MRiGŻ 11.
- NELLIST M.E. 1998. *Bulk storage drying in theory and practice*. Journal of the Royal Agricultural Society of England 159: 120–135.
- PFOST H.B., MAURER S.G., CHUNG D.S., MILLIKEN G.A. 1976. *Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains*. ASAE Paper No. 76–3520, St. Joseph, MI, USA: 11 ss.
- RYŃIECKI A., SZYMAŃSKI P. (red.) 2002. *Dobrze przechowane zboże*. Wyd. II, MR INFO i Tow. Umiejętn. Roln., Poznań: 116 ss.
- RYŃIECKI A. 1985. *Zastosowanie modelowania i symulacji komputerowej w analizie sterowanego niskotemperaturowego procesu suszenia ziarna pszenicy*. Praca doktorska, Akademia Rolnicza, Poznań: 107 ss.
- RYŃIECKI A. 1992. *Stochastic modelling of grain temperature in near-ambient drying*. Drying Technology 10(1): 123–137.

Słowa kluczowe: suszenie pszenicy, suszenie niskotemperaturowe, poźniwna konserwacja ziarna

Streszczenie

Potwierdzono założenie badawcze o możliwości automatycznej identyfikacji zakończenia procesu suszenia ziarna pszenicy metodą niskotemperaturową w grubej nieruchomej warstwie. Wilgotność pszenicy w zakresie 13–16% w warstwie wylotowej dla powietrza suszącego obliczana jest na podstawie funkcji przeliczeniowej oraz mierzonych na bieżąco temperatury i wilgotności względnej powietrza w wymienionej warstwie ziarna. Jako funkcje przeliczeniowe wykorzystano równania wilgotności równowagowej pszenicy Hendersona i Chunga, zmodyfikowane przez wprowadzenie stałych, których wartości wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów, dopasowując krzywe suszenia przewidywane do pomiarowych, uzyskanych w serii eksperymentów naturalnych. Dokładność zaproponowanej metody identyfikacji zakończenia suszenia jest wystarczająca do zastosowania praktycznego w poźniwnej konserwacji pszenicy.

AUTOMATIC IDENTIFICATION OF THE END OF NEAR-AMBIENT DRYING OF WHEAT IN A DEEP-STATIONARY-BED

Antoni Ryniecki, Marzena Gawrysiak-Witulska
Institute of Food Technology of Plant Origin,
Agricultural University, Poznań

Key words: wheat grain, low-temperature drying, post-harvest grain preservation

Summary

Thesis was proved that automatic identification of the end of near-ambient wheat drying in a deep bed is possible. Wheat moisture content within the range from 13 to 16 (% w.b.) inside an outlet layer of grain is determined using a transfer function as well as temperature and air relative humidity measured on line in the above layer of grain. Relationships of the equilibrium relative humidity of Henderson and Chung modified by implementing constants were used as a transfer functions. The least-square method was used to find values of implemented constants. Predicted curves were fitted to that obtained in a series of natural experiments. An accuracy of the proposed method of identification the end of near-ambient drying is acceptable in practice, especially in the post-harvest conservation of wheat.

Dr hab. inż. Antoni **Ryniecki**
Instytut Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego
Akademia Rolnicza
ul. Wojska Polskiego 31
60-637 POZNAŃ