

WPŁYW GRUBOŚCI KRAŻKÓW JABŁEK NA CZAS TRWANIA PIERWSZEGO OKRESU SUSZENIA

Roland Zawiślak, Helena Lisowa

Katedra Techniki Ciepłej, Akademia Rolnicza
ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin

Streszczenie. Zbadano kinetykę suszenia owoców jabłoni odmiany 'Jonagold' – rozdrobnionych na krążki o średnicy 20 mm i grubości odpowiednio 3, 4, 5, 7 i 10 mm – w temperaturze 55°C, przy prędkości przepływu powietrza suszącego 0,5 m·s⁻¹ oraz określono temperaturę termometru mokrego powietrza suszącego. Proces suszenia krążków jabłek realizowano w warunkach konwekcji wymuszonej od wilgotności początkowej 85% do momentu osiągnięcia przez badany surowiec wilgotności wynoszącej 16%. Wykorzystując wyniki badań określono, z założonym błędem względnym nie przekraczającym 5%, czas trwania pierwszego okresu suszenia dla poszczególnych grubości krążków, który wyniósł odpowiednio: $\tau_{1(3 \text{ i } 4 \text{ mm})} = 2700$ s, $\tau_{1(5 \text{ mm})} = 3600$ s, $\tau_{1(7 \text{ mm})} = 5400$ s, $\tau_{1(10 \text{ mm})} = 7200$ s. Na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji stwierdzono istotny wpływ (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$) grubości krążków jabłek na czas trwania pierwszego okresu suszenia, przy czym wraz ze wzrostem grubości krążków rośnie czas trwania pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia.

Słowa kluczowe: jabłka, konwekcja wymuszona, model matematyczny

WYKAZ OZNACZEŃ

- b – współczynnik skurczu, (-);
- k_0 – początkowy współczynnik szybkości suszenia, (kg H₂O · kg⁻¹ s · m · s⁻¹);
- L_0 – początkowa grubość krążka, (m);
- n – współczynnik wyznaczany empirycznie, (-);
- s – skurcz suszarniczy, (-);
- τ – czas suszenia, (s);
- τ_1 – czas trwania pierwszego okresu suszenia, (s);
- t_A – temperatura powierzchni suszonego materiału, (°C);
- t_M – temperatura mokrego termometru, (°C);
- t_p – temperatura suszącego powietrza, (°C);
- u – zawartość wody w próbce, (kg H₂O · kg⁻¹ s · m.);

- u_0 – początkowa zawartość wody w próbce, ($\text{kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \text{s.m.}$);
 u_k – krytyczna zawartość wody w próbce, ($\text{kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \text{s.m.}$);
 v – prędkość przepływu powietrza, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

WSTĘP

Proces konwekcyjnego suszenia produktów rolno-spożywczych w dużej mierze zależy od ich wilgotności. Jeżeli suszony materiał jest dostatecznie wilgotny, tzn. średnia zawartość wody w danym surowcu jest większa od krytycznej zawartości wody, wówczas suszenie rozpoczyna się w pierwszym okresie, a gdy wilgotność osiągnie wartość krytyczną, proces zaczyna przebiegać w drugim okresie suszenia. Brink [1] stwierdził, że temperatura powierzchni suszonego surowca w pierwszym okresie jest stała i odpowiada temperaturze termometru mokrego powietrza suszącego, natomiast wymiana ciepła i masy w tym okresie zależy tylko od warunków zewnętrznych – wewnętrzna struktura materiału nie ma wówczas żadnego wpływu na przebieg procesu suszenia. Pabis [5] przedstawił model matematyczny pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia uwzględniający zjawisko skurczu suszarniczego, w postaci równania:

$$u(\tau) = u_0 \left[\frac{1}{1-b} \left(1 - \frac{(1-b)(3n-2)}{3nu_0} k_0 \tau \right)^{\frac{3n}{3n-2}} - \frac{b}{1-b} \right]. \quad (1)$$

Zakładając izotropowy skurcz materiału we wszystkich kierunkach ($n=1$) oraz uwzględniając skurcz suszarniczy zaproponowany przez Jaros [3]:

$$s = 1 - b, \quad (2)$$

model (1) można sprowadzić do podanej poniżej formy wielomianu trzeciego stopnia:

$$u(\tau) = u_0 - k_0 \tau + \frac{sk_0^2}{3u_0} \tau^2 - \frac{s^2 k_0^3}{27u_0^2} \tau^3. \quad (3)$$

Górnicki i Kaleta [2] wykorzystując, uzyskane przez różnych autorów, dane z pomiarów kinetyki suszenia następujących warzyw, suszonych w cienkiej warstwie w warunkach konwekcji naturalnej, tj. buraków ćwikłowych, cebuli, marchwi, pietruszki, pozytywnie zweryfikowali model matematyczny pierwszego okresu suszenia (3) uwzględniający zjawisko skurczu suszarniczego. Ponadto występowanie pierwszego okresu w procesie konwekcyjnego suszenia potwierdzono dla jabłek suszonych w warunkach konwekcji wymuszonej [7].

Celem pracy było określenie wpływu grubości krążków jabłek na czas trwania pierwszego okresu suszenia w warunkach konwekcji wymuszonej. Realizacja postawionego celu wymagała wyznaczenia czasu trwania pierwszego okresu suszenia dla poszczególnych grubości krążków jabłek na podstawie wyników przeprowadzonych badań kinetyki suszenia i skurczu suszarniczego oraz pomiaru temperatury termometru mokrego powietrza suszącego.

MATERIAŁ I METODY

Materiał doświadczalny stanowiły owoce jabłoni odmiany 'Jonagold' w formie krążków o średnicy 20 mm i grubości odpowiednio 3, 4, 5, 7 i 10 mm. Rozdrobniony w ten sposób surowiec, po wymieszaniu w obrębie każdej grubości, stanowił średnią próbę, którą następnie podzielono na dwie części. Pierwsza część posłużyła do wyznaczenia zawartości suchej masy a tym samym wilgotności początkowej materiału, natomiast druga do badań kinetyki suszenia.

Oznaczenie zawartości suchej masy metodą wagową zostało przeprowadzone zgodnie z PN-90/A-75101/03 przy użyciu suszarki próżniowej SPT-200 „Vaccum drier”. Temperatura w suszarce wynosiła 70°C a ciśnienie 3 kPa. Umieszczone w niej trzy próbki o masie 100 g zważono po upływie czterech godzin od chwili ich włożenia na wadze laboratoryjnej Precisa 800 M z dokładnością $\pm 0,001$ g, a następnie czynność tę powtarzano co 30 min. do momentu, w którym materiał wysuszony został do suchej masy, tj. dwa kolejne wyniki ważenia nie różniły się między sobą więcej niż 0,001 g.

Do wyznaczenia kinetyki suszenia wykorzystano dwie próbki o masie 100 g, które suszono konwekcyjnie przy użyciu suszarki sitowej „Bio Dörer” (na dwóch sitach) w temperaturze 55°C, przy prędkości przepływu powietrza suszącego wynoszącej $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. W czasie trwania procesu dokonywany był pomiar masy suszonego surowca z dokładnością $\pm 0,001$ g, na podstawie czego wyznaczono zmiany zawartości wody z błędem względnym maksymalnym nie przekra-

czającym 0,1% oraz temperatury powierzchni suszonych krążków jabłek z dokładnością $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Pomiar przeprowadzono w trzech powtórzeniach.

Skurcz suszarniczy badanego materiału wyznaczono wg metodyki opisanej w pracy [4].

Pomiar temperatury termometru mokrego powietrza suszącego przeprowadzony został z dokładnością $\pm 0,1^\circ\text{C}$, w trzech powtórzeniach.

WYNIKI I DYSKUSJA

Wykorzystując wyniki badań sformułowano równania empiryczne o postaci wielomianu trzeciego stopnia, opisujące zmiany zawartości wody w czasie trwania procesu dla poszczególnych grubości krążków. Uwzględniając wartości skurczu suszarniczego $s = 0,83$ – dla krążków o początkowej grubości 3, 4 i 5 mm oraz $s = 0,81$ – dla grubości krążków 7 i 10 mm, opracowano równania modelu matematycznego pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia dla rozpatrywanych pięciu poziomów początkowej grubości krążków. Czas trwania pierwszego okresu suszenia dla poszczególnych grubości krążków wyznaczono wstępnie na podstawie pomiarów t_A i t_M (z założonym błędem względnym nie przekraczającym 5%) i wyniósł on odpowiednio: $\tau_{1(3 \text{ i } 4 \text{ mm})} = 2700 \text{ s}$, $\tau_{1(5 \text{ mm})} = 3600 \text{ s}$, $\tau_{1(7 \text{ mm})} = 5400 \text{ s}$, $\tau_{1(10 \text{ mm})} = 7200 \text{ s}$. Po zweryfikowaniu w tych przedziałach czasowych opracowanych równań modelu matematycznego pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia, również z błędem względnym nie przekraczającym w każdym przypadku 5%, uznano je za faktyczny czas trwania pierwszego okresu suszenia.

Równania regresji o postaci wielomianu trzeciego stopnia, równania modelu matematycznego pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia uwzględniającego zjawisko skurczu suszarniczego oraz czas trwania pierwszego okresu suszenia dla poszczególnych grubości krążków jabłek umieszczono w tabeli 1.

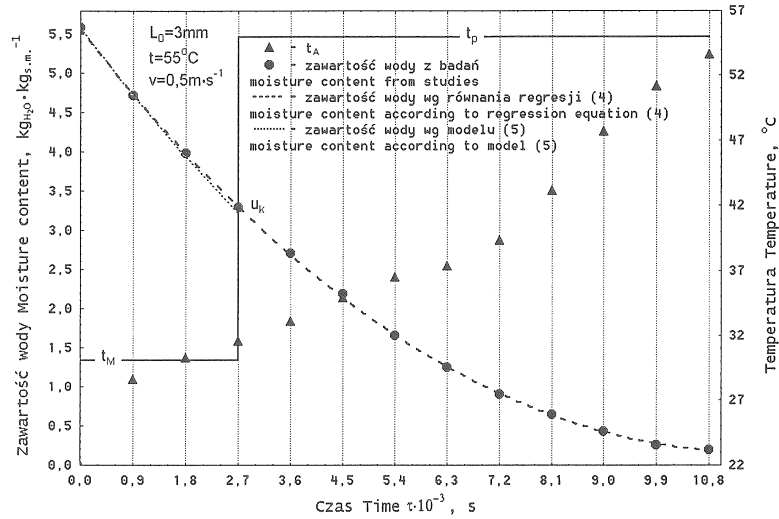
Dane z pomiarów oraz opracowane równania regresji o postaci wielomianu trzeciego stopnia i równania modelu matematycznego pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia przedstawiono na rysunkach 1-5.

Z rysunków 1-5 wynika jednoznacznie, że zawartość wody obliczona przy użyciu równań regresji o postaci wielomianu trzeciego stopnia oraz równań modelu matematycznego pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia (zestawionych w tabeli 1) jest niemal identyczna z uzyskaną doświadczalnie w całym czasie trwania pierwszego okresu suszenia.

Tabela 1. Zestawienie, opracowanych na podstawie wyników badań, równań regresji o postaci wielomianu trzeciego stopnia, równań modelu matematycznego pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia oraz czasu trwania pierwszego okresu suszenia dla poszczególnych grubości krążków jabłek

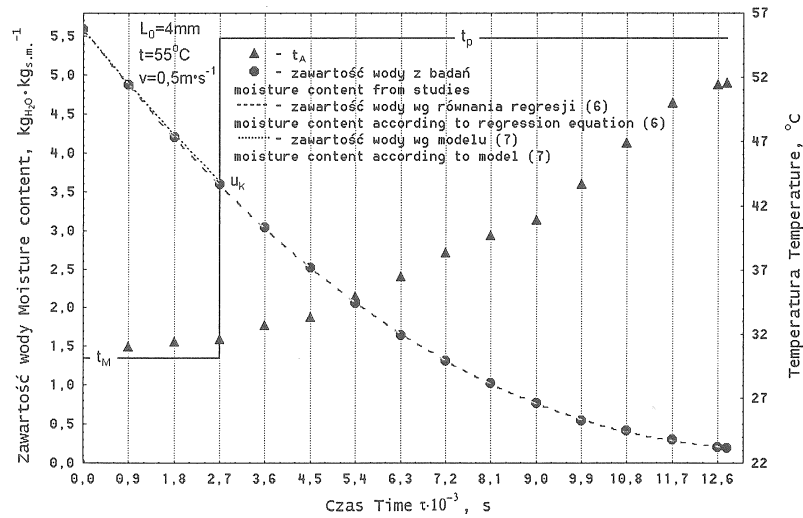
Table 1. List of regression equations in the form of third degree multinomials, mathematical model equations of the first period convection drying and the duration of the first period of drying for various apple thickness rings – based on the results of research

$L_0 \cdot 10^3$ (m)	Równanie regresji o postaci wielomianu trzeciego stopnia Regression equation in the form of a third degree multinomial	τ_1 (s)
	Model matematyczny pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia Mathematical model of the first period convection drying	
3	$u(\tau) = -2,242E - 013\tau^3 + 4,512E - 008\tau^2 - 0,001\tau + 5,569; R^2=0,999$ (4)	2700
	$u(\tau) = 5,588 - 0,001\tau + \frac{0,83 \cdot 0,001^2}{3 \cdot 5,588} \tau^2 - \frac{0,83^2 \cdot 0,001^3}{27 \cdot 5,588^2} \tau^3$ (5)	
4	$u(\tau) = -2,902E - 013\tau^3 + 3,665E - 008\tau^2 - 0,0008\tau + 5,596; R^2=0,999$ (6)	2700
	$u(\tau) = 5,588 - 0,0008\tau + \frac{0,83 \cdot 0,0008^2}{3 \cdot 5,588} \tau^2 - \frac{0,83^2 \cdot 0,0008^3}{27 \cdot 5,588^2} \tau^3$ (7)	
5	$u(\tau) = -2,967E - 013\tau^3 + 2,801E - 008\tau^2 - 0,0007\tau + 5,554; R^2=0,999$ (8)	3600
	$u(\tau) = 5,588 - 0,0007\tau + \frac{0,83 \cdot 0,0007^2}{3 \cdot 5,588} \tau^2 - \frac{0,83^2 \cdot 0,0007^3}{27 \cdot 5,588^2} \tau^3$ (9)	
7	$u(\tau) = -2,681E - 013\tau^3 + 2,152E - 008\tau^2 - 0,0006\tau + 5,554; R^2=0,999$ (10)	5400
	$u(\tau) = 5,588 - 0,0006\tau + \frac{0,81 \cdot 0,0006^2}{3 \cdot 5,588} \tau^2 - \frac{0,81^2 \cdot 0,0006^3}{27 \cdot 5,588^2} \tau^3$ (11)	
10	$u(\tau) = -2,572E - 013\tau^3 + 1,844E - 008\tau^2 - 0,0005\tau + 5,553; R^2=0,999$ (12)	7200
	$u(\tau) = 5,588 - 0,0005\tau + \frac{0,81 \cdot 0,0005^2}{3 \cdot 5,588} \tau^2 - \frac{0,81^2 \cdot 0,0005^3}{27 \cdot 5,588^2} \tau^3$ (13)	



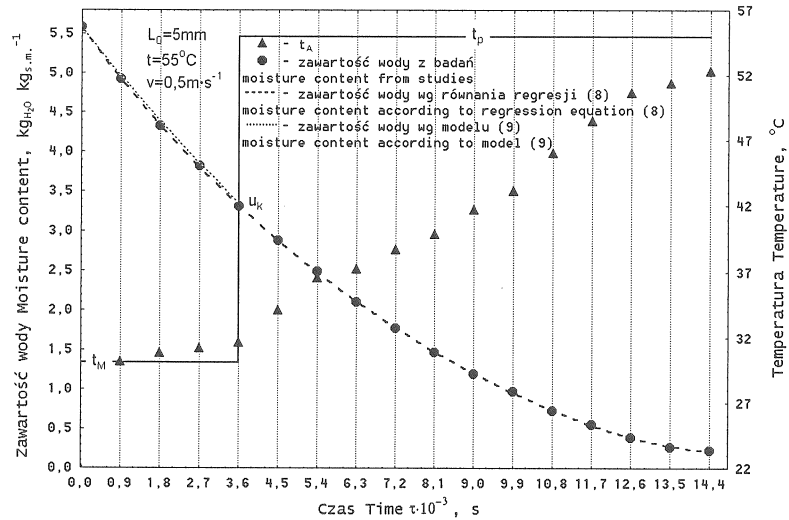
Rys. 1. Wyniki badań u , t_A , t_M oraz u wg równania regresji (4) i modelu matematycznego (5) dla krążków jabłek odmiany 'Jonagold' o początkowej grubości $L_0 = 3$ mm

Fig. 1. Results of u , t_A , t_M and u studies according to regression equation (4) and mathematical model (5) for 'Jonagold' apple rings with the initial thickness $L_0 = 3$ mm



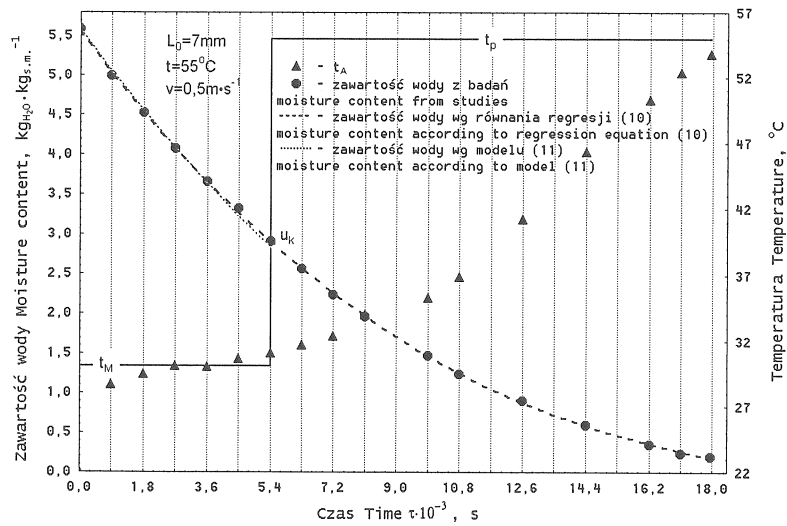
Rys. 2. Wyniki badań u , t_A , t_M oraz u wg równania regresji (6) i modelu matematycznego (7) dla krążków jabłek odmiany 'Jonagold' o początkowej grubości $L_0 = 4$ mm

Fig. 2. Results of u , t_A , t_M and u studies according to regression equation (6) and mathematical model (7) for 'Jonagold' apple rings with the initial thickness $L_0 = 4$ mm



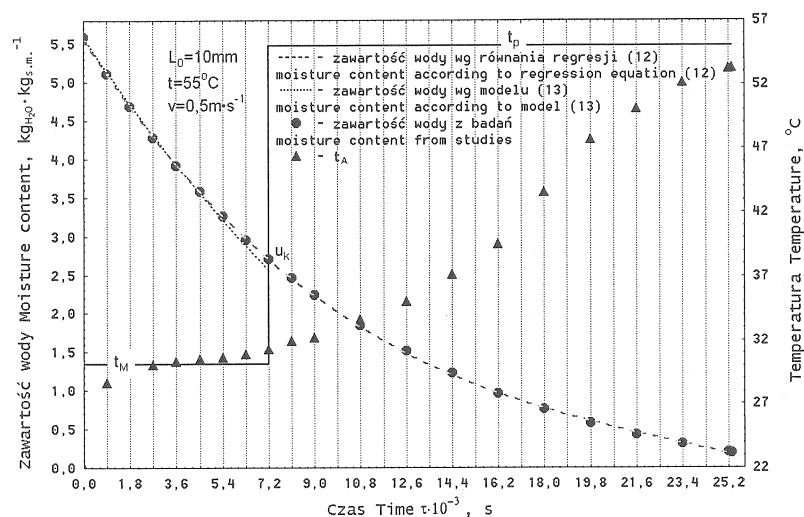
Rys. 3. Wyniki badań u , t_A , t_M oraz u wg równania regresji (8) i modelu matematycznego (9) dla krążków jabłek odmiany 'Jonagold' o początkowej grubości $L_0 = 5$ mm

Fig. 3. Results of u , t_A , t_M and u studies according to regression equation (8) and mathematical model (9) for 'Jonagold' apple rings with the initial thickness $L_0 = 5$ mm



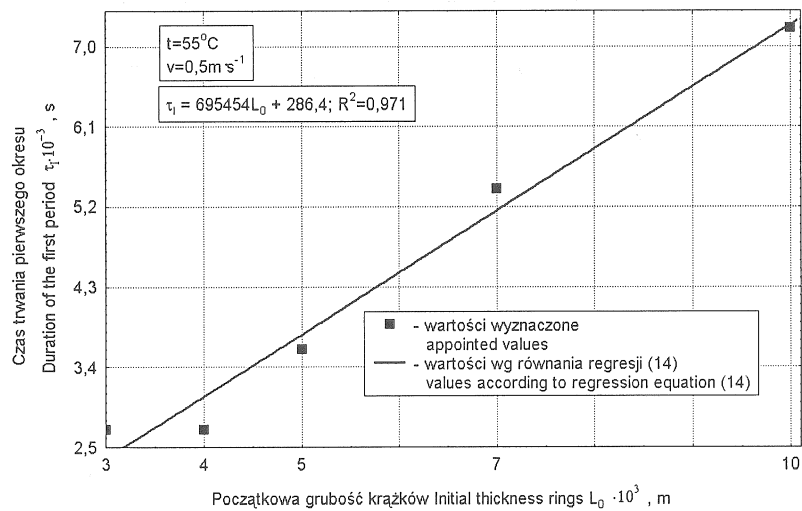
Rys. 4. Wyniki badań u , t_A , t_M oraz u wg równania regresji (10) i modelu matematycznego (11) dla krążków jabłek odmiany 'Jonagold' o początkowej grubości $L_0 = 7$ mm

Fig. 4. Results of u , t_A , t_M and u studies according to regression equation (10) and mathematical model (11) for 'Jonagold' apple rings with the initial thickness $L_0 = 7$ mm



Rys. 5. Wyniki badań u , t_A , t_M oraz u wg równania regresji (12) i modelu matematycznego (13) dla krążków jabłek odmiany 'Jonagold' o początkowej grubości $L_0 = 10$ mm

Fig. 5. Results of u , t_A , t_M and u studies according to regression equation (12) and mathematical model (13) for 'Jonagold' apple rings with the initial thickness $L_0 = 10$ mm



Rys. 6. Wpływ początkowej grubości krążków jabłek na czas trwania pierwszego okresu suszenia

Fig. 6. Influence of apple rings initial thickness on the duration of the first drying period

Wyznaczone wartości czasu trwania pierwszego okresu suszenia dla poszczególnych grubości suszonych krążków jabłek oraz aproksymację otrzymanych wyników, funkcją liniową z wyrazem wolnym, zobrazowano na rysunku 6.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji w regresji, testem F (Fishera-Snedecora) na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, stwierdzono istotność liniowej zależności pomiędzy czasem trwania pierwszego okresu suszenia a początkową grubością krążków jabłek o postaci:

$$\tau_1 = 695454,5L_0 + 286,4 \quad (R^2=0,971) \quad (14)$$

Należy pamiętać, że zależność ta jest prawdziwa dla zakresu początkowej grubości krążków, czy też plasterów jabłek $3 \leq L_0 \leq 10$ mm, suszonych w temperaturze 55°C , przy prędkości przepływu powietrza suszącego wynoszącej $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

WNIOSKI

1. W oparciu o przeprowadzoną analizę wariancji w regresji dla równania (14), na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, stwierdzono istotność liniowej zależności pomiędzy czasem trwania pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia i grubością krążków jabłek, przy czym wraz ze wzrostem grubości krążków rośnie czas trwania pierwszego okresu suszenia.

2. Opracowane, dla poszczególnych grubości krążków, równania modelu matematycznego pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia uwzględniającego zjawisko skurczu suszarniczego (5,7,9,11,13) zweryfikowano empirycznie z błędem względnym nie przekraczającym 5%.

3. Zmiany zawartości wody w całym przedziale czasu procesu konwekcyjnego suszenia, dla poszczególnych grubości krążków, dobrze opisują funkcje aproksymujące o postaci wielomianu trzeciego stopnia (4, 6, 8, 10, 12), a świadczą o tym wysokie wartości współczynnika determinacji, których istotność została potwierdzona testem F.

PIŚMIENNICTWO

1. **Brink H.-J.:** Trocknung von körnigen und pulverförmigen Gütern in Förderlufttrocknern: Wärmelehre und Wärmewirtschaft – Band 22. Verlag Theodor Steinkopff, Dresden, 1975.
2. **Górnicki K., Kaleta A.:** Zastosowanie uogólnionego modelu kinetyki suszenia warzyw w pierwszym okresie do modelowania suszenia warzyw korzeniowych i cebuli: Konwekcyjne suszenie warzyw. Teoria i Praktyka (pod red. S. Pabisa). Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, 129-135, 1999.

3. **Jaros M.:** Analiza i wyznaczanie wartości współczynnika szybkości suszenia w procesie konwekcyjnego suszenia warzyw: Konwekcyjne suszenie warzyw. Teoria i praktyka (pod red. S. Pabisa). Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, 41-50, 1999.
4. **Lis M., Lis H.:** Wpływ procesu suszenia na gęstość wybranych odmian jabłek. *Acta Agrophysica*, 45, 131-142, 2001.
5. **Pabis S.:** The initial stage of convection drying of vegetables and mushrooms and the effect of shrinkage. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72, 187-195, 1999.
6. PN-90/A-75101/03 Przetwory owocowe i warzywne. Przygotowanie próbek i metody badań fizykochemicznych. Oznaczanie zawartości suchej masy metodą wagową. Ustanowiona przez Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości dnia 24 maja 1990 r. (Dz. Norm. i Miar nr 8/1990, poz. 19).
7. **Zawiślak R., Lisowa H., Bochyńska R.:** Weryfikacja modelu matematycznego pierwszego okresu konwekcyjnego suszenia jabłka z uwzględnieniem skurczu suszarniczego. *Acta Scientiarum Polonorum. Technica Agraria*, 1(1), 31-39, 2002.

INFLUENCE OF APPLE RING THICKNESS ON THE DURATION OF FIRST DRYING PERIOD

Roland Zawiślak, Helena Lisowa

Thermal Engineering Department, University of Agriculture
ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin

Abstract. We studied the kinetics of drying apples of the apple-tree 'Jonagold' variety – broken up into rings of the diameter of 20 mm, and thickness, respectively: 3, 4, 5, 7 and 10 mm – in the temperature of 55°C, at the drying air flow velocity of 0,5 m s⁻¹, and determined the thermometer temperature of wet drying air. The apple ring drying process was carried out in forced convection conditions, from the initial moisture content of 85%, until the examined raw material reaches the moisture content of 16%. Using study results, we defined, with assumed relative error not exceeding 5%, the duration of first drying period for particular thickness of apple rings, which was, respectively: $\tau_{1(3 \text{ and } 4 \text{ mm})} = 2700 \text{ s}$, $\tau_{1(5 \text{ mm})} = 3600 \text{ s}$, $\tau_{1(7 \text{ mm})} = 5400 \text{ s}$, $\tau_{1(10 \text{ mm})} = 7200 \text{ s}$. On the basis of the performed variance analysis, we found a significant influence (on the significance level $\alpha = 0,05$) of apple ring thickness on the duration of first drying period, and with the increase of apple ring thickness the duration of the first period of convection drying becomes longer.

Key words: apples, forced convection, mathematical model