

WPŁYW STOPNIA ROZDROBNIENIA JABŁKA NA WARTOŚCI EFEKTYWNEGO WSPÓŁCZYNNIKA DYFUZJI WODY PODCZAS SUSZENIA W WARUNKACH KONWEKCJI WYMUSZONEJ

Roland Zawiślak, Helena Lisowa

Streszczenie Dokonano pomiarów zawartości wody w czasie procesu suszenia i zmian grubości krążków jabłka o początkowej grubości 5, 7 i 10 mm, suszonych w temperaturze 55°C, przy prędkości przepływu powietrza suszącego wynoszącej 0,5 m·s⁻¹. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono duży wpływ stopnia rozdrobnienia jabłek suszonych w warunkach konwekcji wymuszonej na wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody. Wraz ze wzrostem grubości suszonych krążków rosną wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody. Zauważono również, że w początkowym okresie suszenia, dla każdej grubości krążków jabłka, wartości efektywnego współczynnika dyfuzji rosną pomimo spadku wilgotności suszonego materiału. Dopiero po określonym czasie, wynoszącym $\tau_{(5\text{ mm})} = 4,5 \cdot 10^3$ s, $\tau_{(7\text{ i } 10\text{ mm})} = 6,3 \cdot 10^3$ s, odpowiednio dla grubości krążków $L = 5$ mm; 7 i 10 mm, zmniejszaniu się wilgotności suszonego surowca towarzyszy spadek wartości tego współczynnika do końca przeprowadzonego procesu suszenia, tj. do wilgotności wynoszącej 16%.

Słowa kluczowe: efektywny współczynnik dyfuzji, suszenie, konwekcja wymuszona, jabłka

WYKAZ OZNACZEŃ

- A – powierzchnia suszonej płyty, m²
- a_m – efektywny współczynnik dyfuzji wody, m²·s⁻¹
- γ_s – gęstość suchej masy, kg·m⁻³
- Fo_m – liczba Fouriera dla wymiany masy, -
- L – grubość krążka, m
- L_0 – początkowa grubość krążka, m
- n – wyraz szeregu nieskończonego, -
- s – połowa grubości krążka, m
- τ – czas suszenia, s
- u – zawartość wody w próbce, kg H₂O·kg s.m.⁻¹
- u_0 – początkowa zawartość wody w próbce, kg H₂O·kg s.m.⁻¹
- u_r – równowagowa zawartość wody w próbce, kg H₂O·kg s.m.⁻¹
- U – zredukowana zawartość wody w próbce, -

WSTĘP

Całkowity strumień masy w suszonych ciałach stałych jest sumą strumienia masy wywołanego gradientem zawartości wody (∇u) oraz strumienia masy wywołanego gradientem temperatury (∇t). W przypadku konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych strumienie te skierowane są przeciwnie, co wynika z gradientów ∇u i ∇t , a ponadto strumień wywołany gradientem ∇u jest znacznie większy od strumienia wywołanego gradientem ∇t , powodując tym samym ruch wody z wnętrza suszonego materiału do jego powierzchni [Luikov i Michailov 1965].

Zjawisko przemieszczania się wody w surowcu podczas konwekcyjnego suszenia opisywane jest za pomocą efektywnego współczynnika dyfuzji, natomiast współczynnik ten wyznaczany jest najczęściej z równań bazujących na II prawie Ficka [Sherwood 1929, Crank 1975, Carbonell i in. 1986, Raghavan i in. 1995, Nowak i Lewicki 1999, Gürtaş Seyhan i Evranuz 2000]. Modyfikacje tych zależności wynikają głównie ze zróżnicowanej budowy chemicznej i strukturalnej badanych produktów oraz geometrii ich próbek. Pabis [1982], wykorzystując II prawo Ficka dla ciała o kształcie płyty obustronnie suszonej, otrzymał następującą postać równania dyfuzji wody:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (1)$$

gdzie: x – współrzędna mierzona po grubości płyty od środka tej grubości, jest elementem zbioru liczb rzeczywistych z przedziału $\langle -s, +s \rangle$.

Przyjmując odpowiedni warunek graniczny (początkowy i brzegowy) dla równania (1), przedstawił jego rozwiązanie, określające rozkład zawartości wody po grubości płyty, w następujący sposób:

$$\frac{u(\tau, x) - u_r}{u_0 - u_r} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2s} \exp \left[-\frac{\pi^2 (2n+1)^2 a_m \tau}{4 s^2} \right]. \quad (2)$$

Podstawiając:

$$\frac{a_m \tau}{s^2} = Fo_m \quad (3)$$

uzyskał następującą postać równania (2):

$$\frac{u(\tau, x) - u_r}{u_0 - u_r} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2s} \exp \left[-\frac{\pi^2 (2n+1)^2 Fo_m}{4} \right]. \quad (4)$$

Korzystając z warunku określającego masę swobodnej wody w płycie:

$$2\gamma_s As[u(\tau) - u_r] = \gamma_s \int_{-s}^{+s} [u(\tau, x) - u_r] A dx \quad (5)$$

wyzaczył średnią zawartość wody w płycie w czasie trwania procesu suszenia τ w postaci zależności:

$$\frac{u(\tau) - u_r}{u_0 - u_r} = \frac{2}{\pi s} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \exp\left[-\frac{\pi^2(2n+1)^2}{4} Fo_m\right] \int_{-s}^{+s} \cos\frac{(2n+1)\pi x}{2s} dx. \quad (6)$$

Całkując równanie (6) otrzymał następującą jego postać:

$$\frac{u(\tau) - u_r}{u_0 - u_r} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2(2n+1)^2}{4} Fo_m\right]. \quad (7)$$

Celem pracy było określenie wpływu stopnia rozdrobnienia jabłka na wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody podczas suszenia w warunkach konwekcji wymuszonej. Realizacja tego celu wymagała wyznaczenia wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody na podstawie równania (3) na podstawie przeprowadzonych pomiarów zmian zawartości wody w czasie procesu suszenia, które posłużyły do obliczenia wartości liczby Fouriera z zależności (7), oraz zmian grubości suszonych krążków.

MATERIAŁ I METODY

Materiał doświadczalny stanowiły jabłka odmiany 'Jonagold' przechowywane w temperaturze 1°C. Jabłka te zostały pokrojone w krążki o średnicy 18 mm i grubości odpowiednio 5 mm; 7 mm i 10 mm. Rozdrobniony w ten sposób surowiec, po wymieszaniu w obrębie każdej grubości, stanowił średnią próbę, którą następnie podzielono na trzy części. Pierwsza posłużyła do wyznaczenia suchej masy i wilgotności początkowej w trzech powtórzeniach. Drugą suszono konwekcyjnie w sitowej suszarce Bio Dörer, w temperaturze 55°C przy prędkości przepływu powietrza suszącego wynoszącej 0,5 m·s⁻¹, natomiast trzecią wykorzystano do określenia zmian grubości poszczególnych krążków w czasie procesu suszenia.

Do wyznaczenia suchej masy, a tym samym wilgotności początkowej, posłużyła suszarka próżniowa SPT-200 Vacuum drier. Temperatura w suszarce wynosiła 95°C. Umieszczone w niej próbki zważono po upływie trzech godzin od chwili ich włożenia, a następnie, czynność tę powtarzano co 30 min, do momentu, w którym materiał wysuszony został do suchej masy (dokładność pomiaru masy ±0,001 g; liczba powtórzeń – 3).

Próbki o masie 100 g, przeznaczone do suszenia odważono na wadze laboratoryjnej Precisa 800 M z dokładnością ±0,001 g, a następnie włożono do suszarki Bio Dörer. W czasie suszenia dokonywany był pomiar masy suszonego surowca z dokładnością ±0,001 g, na podstawie czego wyznaczono zmiany zawartości wody z błędem nieprzekraczającym 0,08 (liczba powtórzeń – 3).

Zmianę grubości suszonych krążków określono za pomocą suwmiarki (dokładność pomiaru ±0,05 mm). Średnie wyniki pomiarów grubości suszonych krążków zostały uzyskane na podstawie badań próbek złożonych z dwudziestu krążków jabłka odmiany 'Jonagold', przy 8 poziomach wilgotności, w dziesięciu powtórzeniach.

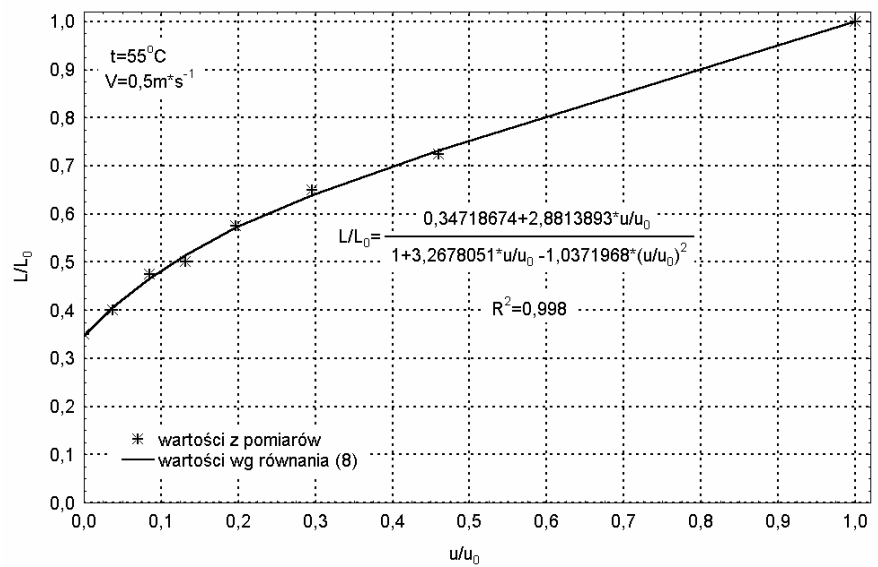
WYNIKI I DISKUSJA

Otrzymane z badań średnie wyniki pomiarów grubości suszonych krążków aproksymowano funkcją nieliniową o następującej postaci:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{0,34718674 + 2,8813893 \left(\frac{u}{u_0} \right)}{1 + 3,2678051 \left(\frac{u}{u_0} \right) - 1,0371968 \left(\frac{u}{u_0} \right)^2}. \quad (8)$$

Funkcja ta dobrze opisuje zmianę grubości suszonych krążków jabłka 'Jonagold', o czym świadczy wysoka wartość współczynnika determinacji wynosząca, $R^2 = 0,998$.

Otrzymane z badań wyniki zależności stosunku grubości (L/L_0) od zawartości wody (u/u_0) oraz przebieg nieliniowej funkcji (8), przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zmiana grubości suszonych krążków jabłka odmiany 'Jonagold'

Fig. 1. The change of thickness in dried 'Jonagold' apple rings

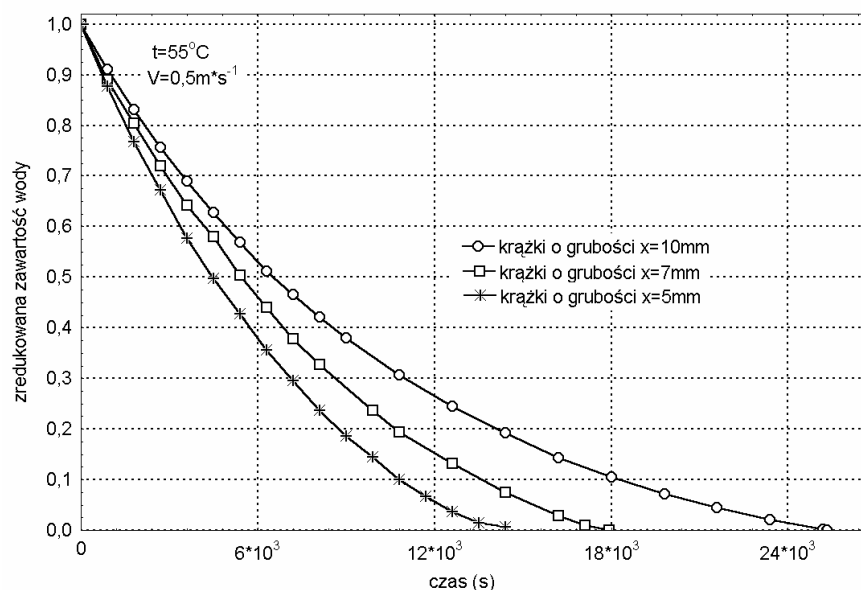
Na podstawie wyznaczonej zawartości wody w czasie procesu suszenia, obliczono zredukowaną zawartość wody (U) w czasie suszenia, dla każdej grubości suszonych krążków jabłka 'Jonagold' (rys. 2).

Wykorzystując, zestawione przez Pabisa [1982], wartości opisujące zależność (7) pomiędzy liczbą Fouriera dla wymiany masy a zredukowaną zawartością wody, dokonano aproksymacji tych wartości funkcją sklejaną. Dla zredukowanej zawartości wody z przedziału $U(\tau) \in \langle 0; 0,493 \rangle$ zastosowano funkcję logarytmiczną następującej postaci:

$$Fo_m = -0,405 \ln[U(\tau)] - 0,0843 \quad (R^2 = 0,999), \quad (9)$$

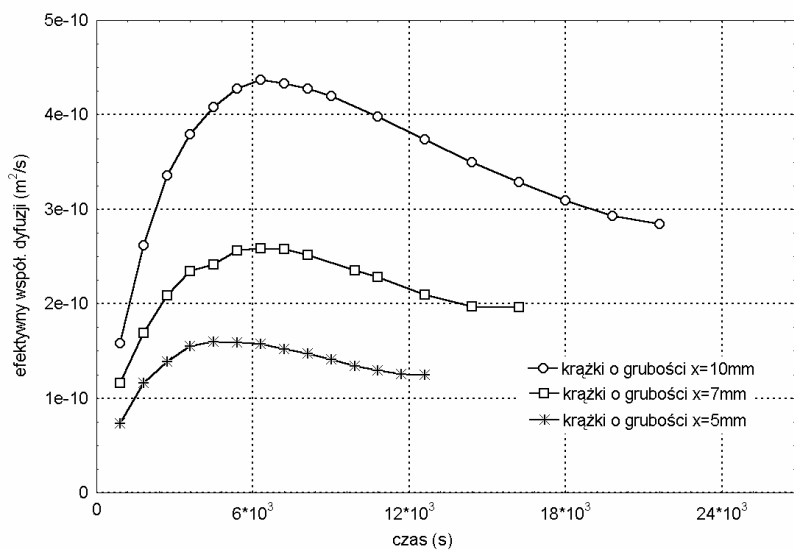
natomiast dla $U(\tau) \in <0,493; 1>$ funkcję kwadratową:

$$Fo_m = 0,7893[U(\tau)]^2 - 1,5767[U(\tau)] + 0,7876 \quad (R^2 = 1). \quad (10)$$



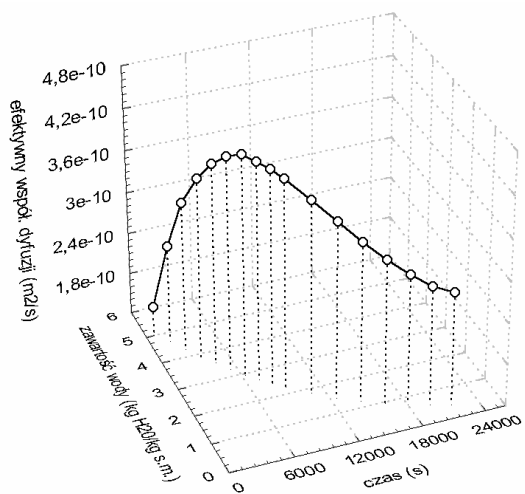
Rys. 2. Krzywe suszenia krążków jabłka odmiany 'Jonagold' o zróżnicowanej grubości
Fig. 2. Drying curves of 'Jonagold' apple rings of varied thickness

Na podstawie danych pomiarowych wielkości zredukowanej zawartości wody (U), przy wykorzystaniu odpowiednio zależności (9) lub (10), określono wartości liczby Fouriera dla wymiany masy. Mając wartości liczby Fouriera dla wymiany masy oraz grubości suszonych krążków w funkcji czasu suszenia, według równania (3), wyznaczono wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody w czasie procesu suszenia. Uzyskane w ten sposób wyniki przedstawiono na rysunku 3. Wraz ze wzrostem grubości suszonych krążków jabłka 'Jonagold' rosną wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody. Zauważono również, że w początkowym okresie suszenia, dla każdej grubości krążków, wartości efektywnego współczynnika dyfuzji rosną w czasie procesu pomimo spadku wilgotności suszonego materiału. Dopiero po określonym czasie, wynoszącym $\tau_{(5\text{ mm})} = 4,5 \cdot 10^3 \text{ s}$, $\tau_{(7 \text{ i } 10\text{ mm})} = 6,3 \cdot 10^3 \text{ s}$, odpowiednio dla grubości krążków $L = 5 \text{ mm}$; 7 i 10 mm, zmniejszaniu się wilgotności suszonego surowca towarzyszy spadek wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody do końca przeprowadzonego procesu suszenia, tj. do wilgotności wynoszącej 16%.



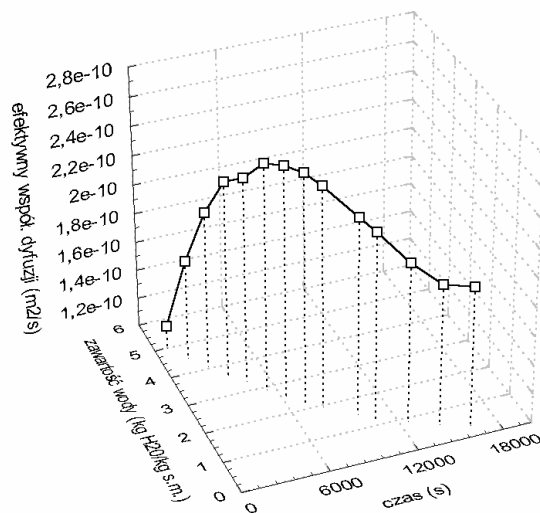
Rys. 3. Efektywny współczynnik dyfuzji wody w czasie suszenia krążków jabłka o zróżnicowanej grubości

Fig. 3. Effective water diffusion coefficient during drying of apple rings of varied thickness

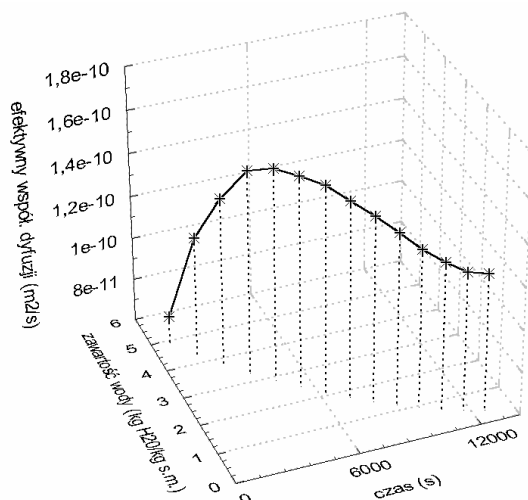


Rys. 4. Przebieg wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody w zależności od czasu suszenia i zawartości wody dla krążków o grubości 10 mm

Fig. 4. Course of effective water diffusion coefficient values depending on the drying time and water content in 10 mm rings



Rys. 5. Przebieg wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody w zależności od czasu suszenia i zawartości wody dla krążków o grubości 7 mm
 Fig. 5. Course of effective water diffusion coefficient values depending on the drying time and water content in 7 mm rings



Rys. 6. Przebieg wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody w zależności od czasu suszenia i zawartości wody dla krążków o grubości 5 mm
 Fig. 6. Course of effective water diffusion coefficient values depending on the drying time and water content in 5 mm rings

Wyznaczone na podstawie badań, wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody zawierają się w granicach $7,29 \cdot 10^{-11}$ – $4,37 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Według Pinagi i in. [1984] współczynnik ten dla różnych produktów rolniczych, suszonych w zakresie temperatury od 25 do 80°C, przyjmuje wartości rzędu 10^{-11} – $10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Na rysunkach 4, 5, 6 zamieszczono wykresy przedstawiające wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody w zależności od zawartości wody i czasu suszenia, dla każdej badanej grubości suszonych krążków jabłka 'Jonagold'.

WNIOSKI

1. Stopień rozdrobnienia jabłka ma duży wpływ na wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody podczas suszenia w warunkach konwekcji wymuszonej. Wraz ze wzrostem grubości suszonych krążków rosną wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody.

2. W obrębie każdej grubości badanych krążków jabłka odmiany 'Jonagold' można zauważyć, że w początkowym okresie suszenia wartości efektywnego współczynnika dyfuzji rosną pomimo spadku wilgotności suszonego materiału. Dopiero po określonym czasie, wynoszącym $\tau_{(5 \text{ mm})} = 4,5 \cdot 10^3 \text{ s}$, $\tau_{(7 \text{ i } 10 \text{ mm})} = 6,3 \cdot 10^3 \text{ s}$, odpowiednio dla grubości krążków $L = 5 \text{ mm}$; 7 i 10 mm, zmniejszaniu się wilgotności suszonego surowca towarzyszy spadek wartości efektywnego współczynnika dyfuzji wody do końca przeprowadzonego procesu suszenia, tj. do wilgotności wynoszącej 16%.

3. Zmianę grubości krążków jabłka 'Jonagold', suszonych w temperaturze 55°C, przy prędkości przepływu powietrza suszącego wynoszącej $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, dobrze opisuje funkcja nieliniowa (8), o czym świadczy wysoka wartość współczynnika determinacji wynosząca, $R^2 = 0,998$.

PIŚMIENNICTWO

- Carbonell J. V., Pinaga F., Yusa V., Pena J. L., 1986. Dehydration of paprika and kinetics of color degradation. *J. Food Eng.* 5(3), 179–193.
- Crank J., 1975. *Mathematics of diffusions*. 2nd ed. Oxford University Press, London.
- Gürtaş Seyhan F., Evranuz Ö., 2000. Low temperature mushroom (*A. bisporus*) drying with desiccant dehumidifiers. *Drying Technol.* 18(1&2), 433–445.
- Luikov A. V., Michailov J. A., 1965. *Theory of energy and mass transfer*. Pergamon Press. Oxford.
- Nowak D., Lewicki P. P., 1999. Wyznaczanie współczynników dyfuzji wody w procesie suszenia jabłek za pomocą promieni podczerwonych. *Zesz. Nauk. Politechniki Łódzkiej* 821. Inż. Chem. Proc. 25. Łódź, 87–94.
- Pabis S., 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych. PWRiL Warszawa, 43–46.
- Pinaga F., Carbonell J. V., Pena J. L., Miguel J. J., 1984. Experimental simulation of solar drying of garlic using an adsorbent energy storage bed. *J. Food Engineering* 3(3), 187–203.
- Raghavan G. S. V., Tulasidas T. N., Sablani S. S., Ramaswamy H. S., 1995. A method of determination of concentration dependent effective moisture diffusivity. *Drying Technol.* 13(5–7), 1477–1488.
- Sherwood T. K., 1929. Drying of solids. *J. Food Eng. Chem.* 21(1), 12–16.

THE INFLUENCE OF APPLE FINENESS DEGREE ON THE VALUES OF EFFECTIVE WATER DIFFUSION COEFFICIENT DURING DRYING IN THE CONDITIONS OF FORCED CONVECTION

Abstract. Water content and changes in apple ring thickness were measured during the drying process. The initial thickness of apple rings amounted to 5, 7 and 10 mm. The apples were dried in the temperature of 55°C, at the drying air flow velocity of 0,5 m·s⁻¹. On the basis of the conducted studies we found out a significant influence of dried apple fineness degree in the conditions of forced convection on the values of effective water diffusion coefficient. With the increase in thickness of dried rings the values of effective water diffusion coefficient grow. It was also noticed that in the initial period of drying, the values of water diffusion coefficient increase for each thickness of apple rings, despite the decrease of humidity of the dried material. It is after a certain time, amounting to $\tau_{(5\text{ mm})} = 4,5 \cdot 10^3$ s, $\tau_{(7 \text{ i } 10\text{ mm})} = 6,3 \cdot 10^3$ s, respectively, for the ring thickness of L = 5 mm, 7 and 10 mm, that the decrease of humidity in the dried raw material is accompanied by the decrease of the value of this coefficient, continuing till the end of drying process, i.e. to the humidity of 16%.

Key words: effective diffusion coefficient, drying, forced convection, apples

Roland Zawisłak, Helena Lisowa, Katedra Techniki Ciepłej, Akademia Rolnicza w Lublinie, ul. Doświadczalna 44, 20-238 Lublin