

BADANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ I DYFUZJI CIEPŁA WYBRANYCH WARZYW METODĄ KRÓTKICH PRZEDZIAŁÓW TEMPERATUROWO-CZASOWYCH

Bogusława Łapczyńska-Kordon

Katedra Energetyki Rolniczej Akademii Rolniczej w Krakowie

Synopsis: W pracy przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika przewodności cieplnej i dyfuzji ciepła w funkcji zawartości wody i gęstości usypnej. Do wyznaczania tych wielkości zastosowano metodę krótkich przedziałów temperaturowo-czasowych.

Słowa kluczowe: współczynnik przewodności cieplnej, współczynnik dyfuzji ciepła, pieczarki, czosnek, metoda krótkich przedziałów temperaturowo-czasowych.

WSTĘP

W obliczeniach wymiany ciepła i masy, zachodzących podczas obróbki cieplnej produktów rolniczych (suszenie, przechowywanie, przygotowanie półproduktów), jak też w matematycznym modelowaniu tych procesów, niezbędna jest znajomość właściwości cieplnych. Oznaczaniem właściwości cieplnych w zależności od zmian zawartości wody i temperatury zajmowano się od lat, stosując różne metody pomiarowe (Sweat; 1974, Kretov i in.; 1966, Jankowski; 1980). Mohsenin [1980] w swej książce opisał większość stosowanych metod i zestawiał w tabelach właściwości cieplne różnych produktów rolniczych i spożywczych, w tym warzyw. Z przeglądu literatury wynika, że istnieje niewiele danych na temat zmian właściwości termofizycznych warzyw w funkcji zawartości wody i jednocześnie gęstości usypnej.

W pracy przedstawiono wyniki badań zmian współczynnika przewodności cieplnej i dyfuzji ciepła w zależności od zawartości wody i gęstości usypnej rozdrobnionych pieczarek i czosnku, z wykorzystaniem metody krótkich przedziałów temperaturowo-czasowych dla warunków nieustalonych (V. S. Volkenstein, 1971).

METODYKA BADAŃ

Każde z badanych warzyw zostało rozdrobnione (postać wiórek), a następnie podsuszone do określonej zawartości wody. Zawartość wody w badanym materiale oznaczono metodą laboratoryjną suszarkową, susząc próbki 30 g w temperaturze 50°C, aż do uzyskania suchej masy. Gęstość usypną mierzono korzystając z definicji tej wielkości - odmierzano w cylindrze miarowym 0.0002 m³ próbki, a następnie ważono z dokładnością do 0.001 kg. Zawartość wody w poszczególnym materiale badawczym wahała się w następujących granicach:

czosnek - $0.056 < u < 1.89$ kg/kg

pieczarki - $0.031 < u < 10.9$ kg/kg

natomiast gęstość usypna:

czosnek - $292,2 < \rho < 472,6$ kg/m³

pieczarki - $129 < \rho < 331,9$ kg/m³.

Każdy pomiar wykonano w trzech powtórzeniach dla 10 poziomów zawartości wody.

1. Pomiar współczynnika dyfuzji cieplnej i przewodności cieplnej

Współczynnik dyfuzji cieplnej i przewodności cieplnej oznaczono metodą niestacjonarną krótkich przedziałów temperaturowo-czasowych (V.S. Volkenstein, 1971). Metoda oparta jest na rozwiązaniu równania dyfuzji ciepła wraz z warunkami brzegowymi pierwszego rodzaju w systemie dwóch ciał: nieograniczonej płyty i półograniczonego cylindra w warunkach nieustalonych. Schemat ideowy stanowiska przedstawia rys. 1. Autorka zaproponowała kilka wariantów tej metody. W tych badaniach wykorzystano trzeci wariant, w którym pomiar składał się z dwóch etapów. W pierwszym etapie przestrzeń A i B napełniono badanym materiałem i uruchamiano układ pomiarowo-rejestrujący. Układ mierzył czas $\Delta\tau$ odpowiadający przedziałowi temperatury wskazanemu przez miliwoltomierz $\Delta N = N_1 - N_2$, gdzie $N_1 = 0,95 N_0$ a $N_2 = 0,9 N_0$; N_0 - początkowa temperatura nagrzewacza. W drugim etapie w przestrzeni A znajdowało się ciało wzorcowe (szkło organiczne) o znanych właściwościach cieplnych: współczynniku dyfuzji ciepła $a_A = 11,1 \times 10^{-8}$ m²/s, współczynniku

przewodności cieplnej $\lambda_A = 0.173 \text{ W/m K}$, natomiast w przestrzeni B, tzw. odbiorniku ciepła, znajdował się badany materiał i mierzono czas $\Delta\tau_1$. Grubość warstwy w przestrzeni A wynosiła 0.019 m. Otrzymane wartości przedziałów czasowych pozwoliły obliczyć z następujących zależności:

- współczynnik dyfuzji cieplnej

$$a = \frac{h^2}{4p\Delta\tau} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (1)$$

p - stała, parametr odczytany z tablic dla $\epsilon = 1$

oraz

- współczynnik przewodności cieplnej

$$\lambda = b \sqrt{a} \quad \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (2)$$

gdzie:

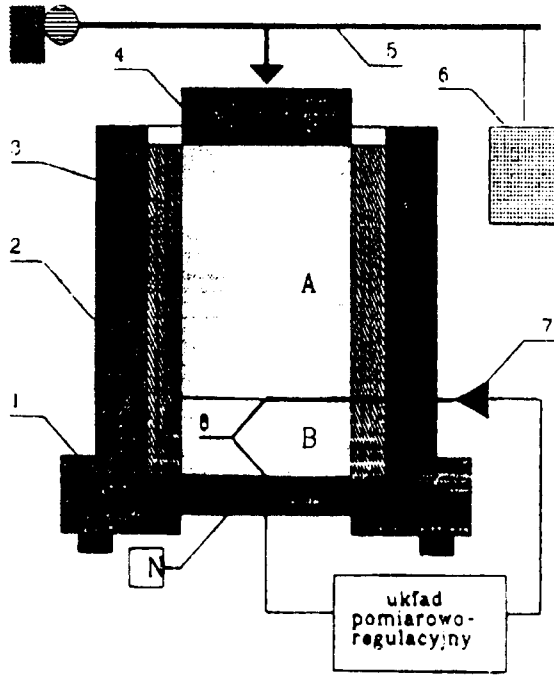
h - grubość warstwy A,

b - stała przyrzędu charakteryzująca jego aktywność cieplną

$$b = \frac{\lambda_A}{\epsilon' \sqrt{a_A}} \quad (3)$$

ϵ' - parametr odczytany z tablic dla:

$$p' = \frac{h_A}{4a_A \Delta\tau_1} \quad (4)$$



Rys.1. Schemat stanowiska pomiarowego

1 - podstawa, 2, 3 - cylinder izolacyjny, 4 - pokrywa, 5 - ramię dźwigni, 6 - ciężarek, 7 - igła, 8 - termopary

A - odbiornik ciepła, B - badany, N - nagrzewnica

Fig.1. Scheme of measuring stand:

1 - base, 2, 3 - insulating cylinder, 4 - cover, 5 - lever arm, 6 - weight, 7 - needle, 8 - thermocouples,

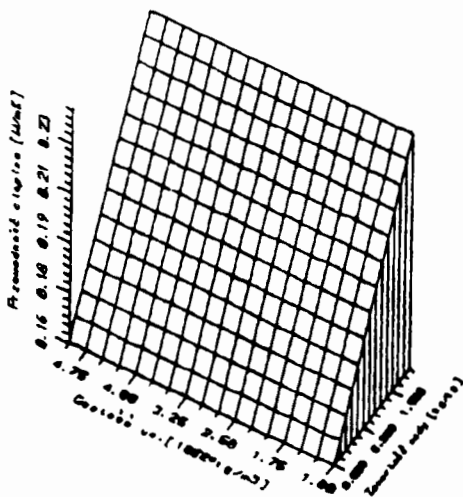
A - heat receiver, B - tested material, N - heater.

WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań opracowano statystycznie (wykorzystując program STATISTICA v. 3.1) i przedstawiono na wykresach (do opracowania korzystano z programu SURFER v.2.0). Wnioskowanie statystyczne przeprowadzono na poziomie istotności = 0.05. Korzystając z regresji wielokryterialnej określono kształt funkcyjnych zależności pomiędzy badanymi właściwościami termofizycznymi a zawartością wody i gęstością usypną badanych warzyw. Obliczono również błąd pomiaru metodą różniczki zupełnej dla każdego przypadku.

1. Współczynnik przewodności cieplnej

Zmienność współczynnika przewodności cieplnej pieczarek i czosnku w funkcji zawartości wody i gęstości usypnej opisują modelowe równania regresji wielokrotnej w badanych przedziałach zawartości wody i gęstości usypnej, przedstawione w tabeli 1, w której zamieszczono też współczynniki korelacji oraz błędy estymacji. Zależności te ilustrują rysunki 2-3.



Rys.2 Współczynnik przewodności cieplnej w funkcji zawartości wody i gęstości usypnej dla czosnku

Fig.2. Thermal conductivity coefficient in function of moisture content (dry basis) and bulk density for garlic.

Współczynnik przewodności cieplnej rośnie liniowo wraz ze wzrostem zawartości wody i gęstości usypnej w czosnku zmieniając się od 0.192 W/mK dla $u=0.056$ kg/kg do 0.3044 W/mK dla $u=1.89$ kg/kg. Wzrost współczynnika przewodności cieplnej wraz z zawartością wody i gęstością usypną należy najprawdopodobniej tłumaczyć tym, że zwiększa się ilość wody powierzchniowej pokrywającej materiał, która tworzy mostki cieplne wodne w wolnych przestrzeniach powietrznych w warstwie. W przypadku pieczarek współczynnik przewodności cieplnej maleje, gdy zawartość wody i gęstość usypna w materiale rosną od 0.3192 W/mK dla $u=0.031$ kg/kg do 0.1468 W/mK dla $u=10.9$ kg/kg. Najprawdopodobniej wynika to z faktu, że w ciałach o gęstości usypnej od 50-300 kg/m³ współczynnik przewodności cieplnej maleje wraz ze wzrostem gęstości usypnej.

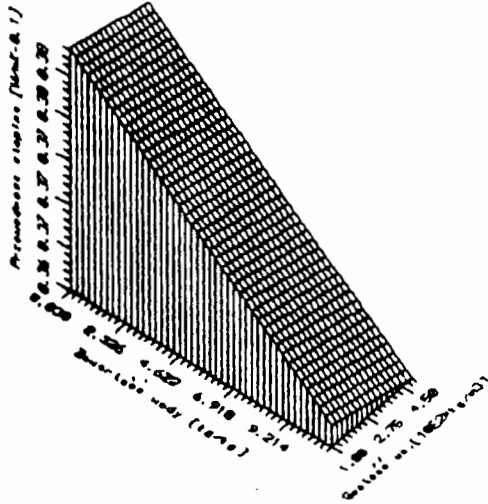
Tabela 1

Równania opisujące zmiany współczynnika przewodności cieplnej w funkcji zawartości wody i gęstości usypnej

Table 1

Equations describing the changes of thermal conductivity coefficient in function of moisture content and bulk density.

| Nazwa materiału | Równania regresji | Współcz. korelacji | Błąd estymacji [%] |
|-----------------|--|--------------------|--------------------|
| Czosnek | $\lambda = 0.1589 + 0.0403u + 0.0001\rho$ $0.056 < u < 1.89 \text{ kg/kg}$ $292 < \rho < 473 \text{ kg/m}^3$ | 0.95 | 0.01 |
| Pieczarki | $\lambda l = 0.3876 - 0.0022u - 0.0006\rho$ $0.031 < u < 10.9 \text{ kg/kg}$ $128 < \rho < 333 \text{ kg/m}^3$ | 0.98 | 0.01 |



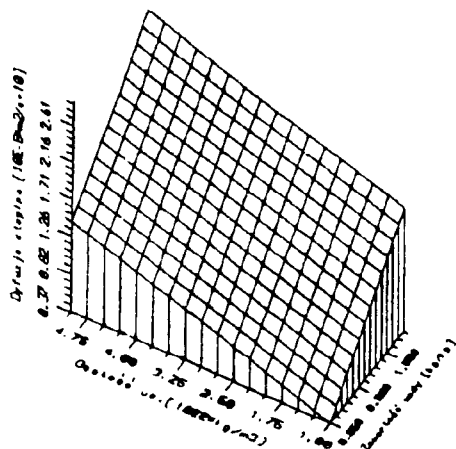
Rys.3 Współczynnik przewodności cieplnej w funkcji zawartości wody i gęstości usypnej dla pieczarek

Fig.3. Thermal conductivity coefficient in function of moisture content (dry basis) and bulk density for mushrooms.

W podobnym zakresie zmienia się gęstość usypna pieczarek. Zjawisko to Camerer (za Lisową, 1980) tłumaczy możliwością istnienia porów o zróżnicowanych wymiarach w materiałach o małym ciężarze objętościowym. Im większe wymiary porów tym intensywniejsza wymiana ciepła przez promieniowanie i konwekcję. W przypadku pieczarek istotny wpływ ma konwekcja, gdyż materiały o dużej wilgotności mają skomplikowaną strukturę 3-fazową: mieszanina gazów, cieczy i ciała stałego. Wysokie współczynniki korelacji dla każdego badanego materiału wskazują na istotny związek pomiędzy tym współczynnikiem a zawartością wody i gęstością usypną. Ocena istotności wpływu zmiennych niezależnych na wartość przewodności cieplnej na poziomie istotności $\alpha=0.05$ wskazała na istotny wpływ zawartości wody w przypadku czosnku, a gęstości usypnej dla pieczarek. Błąd względny pomiaru współczynnika przewodności cieplnej wahał się od 5.37% ($w=65.4\%$) do 6.61% ($w=5.27\%$) dla czosnku, a dla pieczarek od 5.69% ($w=3.05\%$) do 7.76% ($w=91.5\%$).

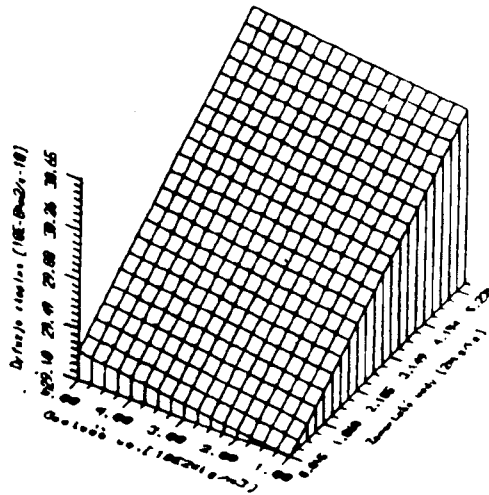
2. Dyfuzja cieplna

Modelowe równania regresji opisujące zmiany współczynnika dyfuzji cieplnej w badanych warzywach w funkcji zawartości wody i gęstości usypnej wraz z współczynnikami korelacji i błędami estymacji zestawiono w tabeli 2, a graficzną interpretację przedstawiają rysunki 4 i 5.



Rys.4 Współczynnik dyfuzji cieplnej w funkcji zawartości wody i gęstości usypnej dla czosnku

Fig.4. Thermal diffusion coefficient in function of moisture content (dry basis) and bulk density for garlic.



Rys.5 Współczynnik dyfuzji cieplnej w funkcji zawartości wody i gęstości usypnej dla pieczarek

Fig.5. Thermal diffusion coefficient in function of moisture content (dry basis) and bulk density for mushrooms.

Otrzymane funkcyjne zależności są liniowe zarówno dla czosnku i pieczarek w badanych przedziałach zawartości wody oraz gęstości usypnej i zmieniają się od $12 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ dla $u=0.056 \text{ kg/kg}$ do $17.8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ dla $u=1.89 \text{ kg/kg}$ w czosnku i od $23.1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ dla $u=0.03 \text{ kg/kg}$ do $13.4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ dla $u=10.9 \text{ kg/kg}$ w pieczarkach. Wartość dyfuzji cieplnej w pieczarkach maleje zarówno ze wzrostem zawartości wody jak i gęstości usypnej, a rośnie dla czosnku. Spadek wartości współczynnika dyfuzji cieplnej przy równoczesnym wzroście zawartości wody i gęstości usypnej w warstwie pieczarek wynika, być może, ze zwiększenia udziału wody w przestrzeniach powietrznych, a jak podaje literatura (Wiśniewski, 1979), wartość współczynnika dyfuzji cieplnej wody jest kilka razy mniejsza od jego wartości w powietrzu. Natomiast rosnący współczynnik w czosnku wskazywałby na znaczny udział przestrzeni powietrznych w warstwie rozdrobnionego czosnku pomimo wysokiej zawartości wody w materiale. Wartości współczynnika korelacji dla badanych warzyw świadczą o silnym związku dyfuzji cieplnej z zawartością i gęstością usypną. Błąd względny pomiaru zmieniał się w zakresie do 2.17% ($w=3.05\%$) do 2.12% ($w=91.5\%$) dla pieczarek i od 2.11% ($w=5.3\%$) do 2.14% ($w=65.6\%$) dla czosnku.

Tabela 2

Równania opisujące zmiany współczynnika dyfuzji ciepła w funkcji zawartości wody i gęstości usypnej

Table 2

Equations describing the changes of thermal diffusion coefficient in function of moisture content and bulk density.

| Nazwa materiału | Równania regresji | Współczynnik korelacji | Błąd estymacji [%] |
|-----------------|---|------------------------|--------------------|
| Czosnek | $a = 10.68 + 2.2u + 0.005\rho$ $0.056 < u < 1.89 \text{ kg/kg}$ $292 < \rho < 493 \text{ kg/m}^3$ | 0.95 | 0.58 |
| Pieczarki | $a = 29.04 + 0.26u + 0.05\rho$ $0.031 < u < 10.9 \text{ kg/kg}$ $128 < \rho < 333 \text{ kg/m}^3$ | 0.97 | 0.86 |

PODSUMOWANIE

Analiza otrzymanych wyników i obliczonych względnych błędów pomiarów pozwala stwierdzić, że zaproponowana metoda krótkich przedziałów temperaturowo-czasowych w warunkach nieustalonych V.S.Volkenstein [1971] do oznaczania współczynnika przewodności cieplnej i dyfuzji cieplnej rozdrobnionych warzyw jest poprawna. Zmiany współczynnika przewodności cieplnej i dyfuzji cieplnej w funkcji zawartości wody i gęstości usypnej w pieczarkach oraz w czosnku opisują liniowe modele regresji. Wysokie współczynniki korelacji świadczą o istotnym związku pomiędzy badanymi wielkościami a zawartością wody i gęstością usypną.

LITERATURA

1. Jankowski T.: Sprawozdanie z tematu badawczego "Wyznaczanie niektórych cech cieplnych buraków cukrowych i marchwi". Problem badawczy nr II.8., 1976-1980, AR Poznań.
2. Kretov I.T., Plieszkov A.I.; 1966: Izmenienije tieplofiziczeskich svojstv vysuszivajemych ovoszcziej. Piszczievaja Tiehnologija, nr 4.
3. Lis H., Haman J., Lis T.; 1976: Właściwości cieplne ciał kapilarno-porowatych i metody ich pomiaru. Problemy Agrofizyki PAN, Ossolineum, z. 22.

4. Mohsenin N.N.; 1980: Thermal properties of foods and agricultural materials. Gordon and Breach Science Publishers, New York, Paris, London.
5. Pabis S.; 1982: Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolnych. PWRiL, Warszawa.
7. Sweat V.E.; 1974: Experimental Values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. Journal of Food Science, vol.39.
8. Volkenstein V.S.; 1971: Skorostnyj metod opriedielenija tiepłofizycznych charakteristik matieriałow. "Energija", Leningradskoje Otdielenije.

Thermal conductivity and thermal diffusion coefficients of selected vegetables measured by short temperature-time interval method

Bogusława Łapczyńska-Kordon

Summary

For calculations of heat exchange at thermal processing of agricultural products, of special importance is the knowledge of their thermal properties, such as specific heat, thermal conductivity and thermal diffusion coefficients as well as their variability depended on material moisture content, density and other physical features.

Paper presents the results of measuring thermal conductivity and thermal diffusion coefficients for the layer of disintegrated garlic and mushrooms, related to the moisture content (dry basic) and bulk density.

The measurements were carried out using short temperature-time interval under transient conditions. Obtained results were analysed statistically; using multiple regression the relationships were described by model equations and plotted on diagrams. It was found that tested coefficients of thermal diffusion change linearly with the moisture content and bulk density. calculated measuring errors showed the correctness of used measuring method.