
KOMITET TECHNIKI ROLNICZEJ PAN
POLSKIE TOWARZYSTWO INŻYNIERII ROLNICZEJ

INŻYNIERIA ROLNICZA

Rok **XI**

10₍₉₈₎

Kraków 2007

RADA PROGRAMOWA

czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Janusz Haman – przewodniczący
czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Rudolf Michałek – wiceprzewodniczący
prof. dr hab. inż. Małgorzata Bzowska-Bakalarz
prof. dr hab. inż. Stanisław Pabis
prof. dr hab. inż. Tadeusz Rawa
prof. dr hab. inż. Józef Szlachta
prof. dr hab. inż. Zdzisław Wójcicki
prof. dr hab. inż. Jan Dawidowski
prof. dr hab. inż. Jerzy Weres

CZŁONKOWIE ZAGRANICZNI

prof. Gerard Wiliam Isaacs (USA) – czł. zagr. PAN
prof. Stefan Cenkowski (Kanada)
prof. Jürgen Hahn (Niemcy)
prof. Radomir Adamovsky (Rep. Czeska)
prof. Oleg Sidorczuk (Ukraina)

KOMITET REDAKCYJNY

czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Rudolf Michałek – redaktor naczelny
czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Janusz Haman
prof. dr hab. inż. Janusz Laskowski
dr inż. Maciej Kuboń – sekretarz

RECENZENCI

Prof. dr hab. inż. Marek Markowski – UWM Olsztyn
Dr hab. inż. Marian Szarycz, prof. UP – UP Wrocław

Wydawca

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Praca wykonana

w Katedrze Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki Akademii Rolniczej w Krakowie

Druk i oprawa:

S.C. DRUKROL (Kraków, al. 29 Listopada 46) tel. (012) 412 46 50

Nakład: 150 egzemplarzy

Rozprawy habilitacyjne

Nr 26

Bogusława Łapczyńska-Kordon

**Model suszenia
mikrofalowo-podciśnieniowego
owoców i warzyw**

(rozprawa habilitacyjna)

Spis treści

SPIS OZNACZEŃ	7
1. WSTĘP	9
2. POSTAWIENIE I UZASADNIENIE PROBLEMU.....	13
3. CEL I ZAKRES PRACY	15
4. MODEL MATEMATYCZNY PROCESU SUSZENIA.....	17
4.1. Analiza modelowanego systemu	17
4.2. Założenia do modelu	20
4.3. Struktura modelu	20
4.4. Warunki początkowo-brzegowe	25
5. MODEL MATEMATYCZNY REHYDRACJI	29
6. RÓWNANIA KONSTITUTYWNE	33
7. OBLICZENIA SYMULACYJNE I WERYFIKACJA MODELU	37
7.1. Metoda numeryczna	37
7.2. Metodyka badań doświadczalnych	39
7.3. Identyfikacja parametrów wejściowych modelu	42
8. ANALIZA WYNIKÓW	45
9. PRZYKŁADOWE EKSPERYMENTY SYMULACYJNE.....	63
10. PODSUMOWANIE	71
11. WNIOSKI	73
12. BIBLIOGRAFIA	75

Spis oznaczeń

$A(\tau)$	– powierzchnia komórki w czasie suszenia, m^2
A_0	– początkowa powierzchnia komórki, m^2
a	– współczynnik dyfuzji ciepła, m^2s^{-1}
c	– ciepło właściwe, $kJ\ kg^{-1}K^{-1}$
C_{c0}	– początkowa zawartość cukru, $kgkg^{-1}$
C_{ck}	– końcowa zawartość cukrów, $kgkg^{-1}$
C_{w0}	– początkowa zawartość witaminy C, $kgkg^{-1}$
C_{wk}	– końcowa zawartość witaminy C, $kgkg^{-1}$
D_u	– współczynnik dyfuzji masy, m^2s^{-1}
D_0	– początkowy współczynnik dyfuzji masy, m^2s^{-1}
D_{0r}	– początkowy współczynnik dyfuzji masy podczas dehydratacji, m^2s^{-1}
E_{nas}	– natężenie pola elektromagnetycznego, Vm^{-1}
f	– częstota, Hz
g	– przyspieszenie ziemskie, ms^{-2}
H	– ciepło parowania wody, Jkg^{-1}
k	– stała szybkości suszenia, s^{-1}
k_r	– stała szybkości rehydratacji, s^{-1}
L	– wymiar charakterystyczny, m
p	– ciśnienie, Pa
N_0	– moc mikrofal, W
N_{in}	– moc indukowana w materiale, W
p_{ot}	– ciśnienie otoczenia, Pa
p_w	– ciśnienie wewnętrzne, Pa
R_p	– stała gazowa pary wodnej, $Jkg^{-1}K^{-1}$
$ru(\tau)$	– chwilowa zawartość wody w materiale uwadnianym, $kgH_2O\ kg^{-1}$
ru_o	– początkowa zawartość wody w materiale uwadnianym, $kgH_2O\ kg^{-1}$
ru_r	– równowagowa zawartość wody w materiale uwadnianym, $kgH_2O\ kg^{-1}$
s	– współczynnik skurczu
t	– czas, s
T	– temperatura materiału, K
u	– zawartość wody, $kgH_2O\ kg^{-1}$
u_0	– początkowa zawartość wody, $kgH_2O\ kg^{-1}$
u_r	– równowagowa zawartość wilgoci, $kgH_2O\ kg^{-1}$
V_j	– objętość początkowa, m^3
$V(\tau)$	– objętość w czasie suszenia, m^3
x	– współrzędna kartezjańska, m
λ	– współczynnik przewodności cieplnej, $Wm^{-1}K^{-1}$
λ_m	– współczynnik przewodności masy, ms^{-1}
ρ	– gęstość materiału, kgm^{-3}

ρ_s	– gęstość suchej substancji, kgm^{-3}
ρ_u	– gęstość pary wodnej, kgm^{-3}
η	– lepkość dynamiczna, Pa s
ν	– współczynnik lepkości kinematycznej, m^2s^{-1}
α	– współczynnik przejmowania ciepła, Wm^{-2}K
β	– współczynnik rozszerzalności termicznej, K^{-1}
ϵ_0	– przenikalność dielektryczna próżni, Fm^{-1}
ϵ_w	– przenikalność dielektryczna wody, Fm^{-1}
ϵ_0''	– współczynnik strat dielektrycznych cząstki w chwili początkowej
ϵ_{ss}	– przenikalność dielektryczna suchej substancji, Fm^{-1}
α_m	– współczynnik przejmowania masy, kgm^{-2}
δ_T	– współczynnik termogradientny, K^{-1}
δ_p	– współczynnik ciśnieniowy, Pa^{-1}
Pr	– liczba Prandtla
Sh	– liczba Sherwooda
Pe	– liczba Pecleta
Nu	– liczba Nusselta
Sc	– liczba Schmidta
Ar	– liczba Archimedesza

THE MICROWAVE-VACUUM DRYING MODEL FOR FRUIT AND VEGETABLES

Abstract. The paper presents generalised mathematical model of the microwave-vacuum drying process for fruit and vegetables, which characterises heat and mass transport and changes in selected qualitative characteristics including: content of vitamin C and saccharides, and deformations defined by dehydration shrinkage coefficient. A rehydration kinetics model has been proposed because it is also possible to evaluate dried material by its rehydration capacity. The Lykov model was employed to characterise heat and mass transport. The model was formulated for transient drying process of capillary-porous substances, which takes into account the effects of concentration, temperature and pressure gradient on water transport to the material surface. The analysis of microwave-vacuum drying process shows that it is necessary to take into account these gradients in order to obtain complete specification of this process. Qualitative characteristics were presented by equations defining kinetics of changes for saccharides and vitamin C, and an algebraic equation defining changes of dehydration shrinkage coefficient in relation to water content. Empirical verification for the material of parsley, garlic and apple, carried out by comparing experimental results to computations made using the models, confirmed their correctness and sensitivity to parameter changes. On the grounds of example simulation computations, carried out using the drying and rehydration models for the analysed materials, it was proved that the increase of microwave energy stream at constant underpressure results in higher rate of water content changes. Similar effects are observed in the case of increasing underpressure at constant microwave energy stream. The impact of microwaves gives higher drying effect than the changes of underpressure within assumed variability ranges. Moreover, it was found that the lower water content in dried material, the higher saccharides content and higher shrinkage, but lower vitamin C content and lower susceptibility to rehydration.

Key words: microwave-vacuum drying, mathematical model, heat and mass transport, shrinkage coefficient, rehydration