

MODELOWANIE PIERWSZEGO OKRESU KONWEKCYJNEGO SUSZENIA CZĄSTEK KORZENIA PIETRUSZKI

Krzysztof Górnicki, Agnieszka Kaleta

Katedra Podstaw Inżynierii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Wstęp

Suszenie jest złożonym procesem, w którym występuje jednoczesny transport ciepła i masy. Jak dotąd nie powstała jeszcze kompleksowa teoria konwekcyjnego suszenia warzyw i owoców. Obszerny przegląd literatury, dotyczący modelowania procesu konwekcyjnego suszenia warzyw, znaleźć można m.in. w pracy GÓRNICKIEGO [2000]. W dostępnej literaturze istnieje niewiele prac na temat konwekcyjnego suszenia pietruszki. W większości dotyczą one bardzo fragmentarycznych badań procesu suszenia korzenia pietruszki lub badań jakościowych [BUGROWA 1971; DAUDIN, RICHARD 1982; STEHLI i in. 1988; DOMAGAŁA i in. 1996a, 1996b; WITROWA-RAJCHERT 1999]. W literaturze nie znaleziono natomiast prac poświęconych modelowaniu procesu konwekcyjnego suszenia korzeni pietruszki.

Cel pracy

Celem pracy była empiryczna weryfikacja modeli kinetyki suszenia w pierwszym okresie suszenia dla cząstek korzenia pietruszki.

Materiał i metody

Do badań w ramach niniejszej pracy wykorzystano oczyszczone korzenie pietruszki odmiany 'Berlińska'. Przygotowano próbki w postaci plasterków pietruszki krojonych w poprzek i wzdłuż korzenia oraz plasterków walca osiowego i pierścieni kory korzenia pietruszki krojonych w poprzek korzenia. Grubości plasterków i pierścieni wynosiły 3, 6 i 9 mm, zaś temperatury powietrza suszącego 40, 50, 60, 70 i 80°C.

Podczas suszenia cząstek w warunkach konwekcji naturalnej wykonano pomiary zmian następujących parametrów: zawartości wody w cząstkach, temperatury na powierzchni i wewnątrz cząstek, objętości cząstek. Szczegóły dotyczące metodyki pomiarów znajdują się w pracy GÓRNICKIEGO [2000] oraz GÓRNICKIEGO i KALETY [2002].

Przebieg procesu suszenia w pierwszym okresie determinują zewnętrzne warunki wymiany masy. W tabeli 1 przedstawiono modele wykorzystywane w pracy do opisu pierwszego okresu suszenia cząstek korzenia pietruszki.

Tabela 1; Table 1

Modele pierwszego okresu suszenia [PABIS 1965, 1994; MURAKOWSKI 1994]
 Models of the first drying period [PABIS 1965, 1994; MURAKOWSKI 1994]

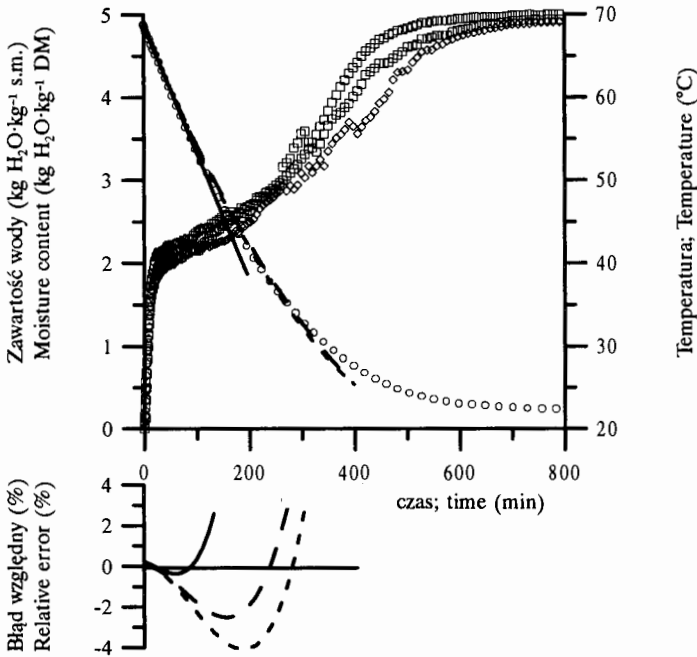
Modele pierwszego okresu suszenia Models of the first drying period	Uwzględniony model skurczu suszarniczego Shrinkage model applied
$u(\tau) = -k\tau + u_0$ (1)	nie uwzględniono; not applied
$u(\tau) = \frac{u_0}{a} \left[\left(1 - \frac{ak\tau}{3u_0} \right)^3 + a - 1 \right]$ (2)	$\frac{V}{V_0} = a \frac{u}{u_0} + 1 - a$ (3) a – parametr; parameter
$u(\tau) = \left[\frac{(2n-3)k\tau + 3u_0}{3u_0^{2n/3}} \right]^{\frac{3}{3-2n}}$ (4)	$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{u}{u_0} \right)^n$ (5) n – parametr; parameter

Występujący w modelach pierwszego okresu suszenia parametr k określa początkową szybkość suszenia. Szybkość tę wyznaczano za pomocą regresji liniowej, badając liniowość równania (1) dla funkcji aproksymującej cztery powtórzenia pomiarów zawartości wody w suszonych cząstkach, przy błędzie względnym nie większym niż 1%. Tak wyznaczona wartość początkowej szybkości suszenia wykorzystywana była we wszystkich modelach pierwszego okresu suszenia (1, 2 i 4). Założono, że modele te poprawnie opisują kinetykę suszenia, gdy wartość błędu względnego modelu liniowego (1) nie przekroczy 1%, a uwzględniających skurcz suszarniczy modeli (2) i (4), ze względu na charakter przebiegu ich błędów względnych, nie przekroczy 4%. Parametry a i n były dobrane przy użyciu programu Statistica, jako parametry występujące w równaniach (odpowiednio modelu (3) i (5)) aproksymujących punkty pomiarowe.

Wyniki i dyskusja

Modele pierwszego okresu suszenia zweryfikowano przy użyciu danych eksperymentalnych. Wartości wyznaczone z modeli pierwszego okresu suszenia porównywano z wartościami obliczonymi z funkcji aproksymującej wyniki czterech powtórzeń pomiarów zmian zawartości wody w czasie.

Analizując uzyskane wyniki modelowania (przykładowy rysunek 1) można stwierdzić, że zarówno model liniowy, jak i oba modele uwzględniające skurcz suszarniczy dobrze opisują proces. Model liniowy kończy opisywanie procesu suszenia w momencie rozpoczynania się powolnego wzrostu temperatury suszonego ciała od temperatury bliskiej temperaturze mokrego termometru. Modele uwzględniające skurcz suszarniczy kończą opisywanie procesu w momencie gwałtownego wzrostu temperatury suszonego ciała. Oba modele uwzględniające skurcz suszarniczy jednakowo dobrze opisują proces suszenia, nie można więc jednoznacznie stwierdzić, który z nich jest lepszy.



Rys. 1. Modelowanie pierwszego okresu suszenia plasterów o grubości 9 mm, krojonych w poprzek korzenia pietruszki, suszonych w temperaturze 70°C: (○) zawartość wody, (□) temperatura na powierzchni suszonego materiału, (◇) temperatura wewnątrz suszonego materiału, (—) model liniowy (1), (- -) model ze skurczem (2), (- · -) model ze skurczem (4)

Fig. 1. Modelling of the first drying period of 9 mm thick crosswise cut parsley slices dried at 70°C: (○) moisture content, (□) temperature on the dried slices surface, (◇) temperature inside the dried slices, (—) linear model (1), (- -) model with shrinkage (2), (- · -) model with shrinkage (4)

Dla wszystkich rodzajów cząstek potwierdziła się zależność, że model uwzględniający skurcz suszarniczy opisuje proces suszenia w dłuższym zakresie czasowym niż model liniowy.

Na rysunku 2 przedstawione są przebiegi czasów opisywania pierwszego okresu suszenia i wartości krytycznej zawartości wody wyznaczonych z modelu liniowego i modelu uwzględniającego skurcz suszarniczy oraz początkowej szybkości suszenia przykładowo dla plasterów poprzecznych korzenia pietruszki o różnej grubości suszonych w różnych temperaturach. Wraz ze wzrostem temperatury czynnika suszącego i zmniejszaniem się grubości cząstki skraca się czas trwania opisu procesu przez matematyczne modele pierwszego okresu suszenia, bowiem skraca się wtedy również czas trwania całego procesu. Czas opisu procesu przez model liniowy pierwszego okresu suszenia jest czasami nawet prawie czterokrotnie krótszy od czasu tego opisu przez modele uwzględniające skurcz suszarniczy. Spowodowane jest to tym, że model liniowy nie uwzględnia w opisywanym przez niego procesie zmian powierzchni wymiany ciepła i masy podczas suszenia. W przypadku korzenia pietruszki zauważono natomiast dość znaczną zmianę wymiarów cząstek w czasie ich suszenia. Dane empiryczne potwierdziły również, że szybkość suszenia zmniejsza się już od początku trwania procesu, aczkolwiek w

Tabela 1; Table 1

Modele pierwszego okresu suszenia [PABIS 1965, 1994; MURAKOWSKI 1994]
 Models of the first drying period [PABIS 1965, 1994; MURAKOWSKI 1994]

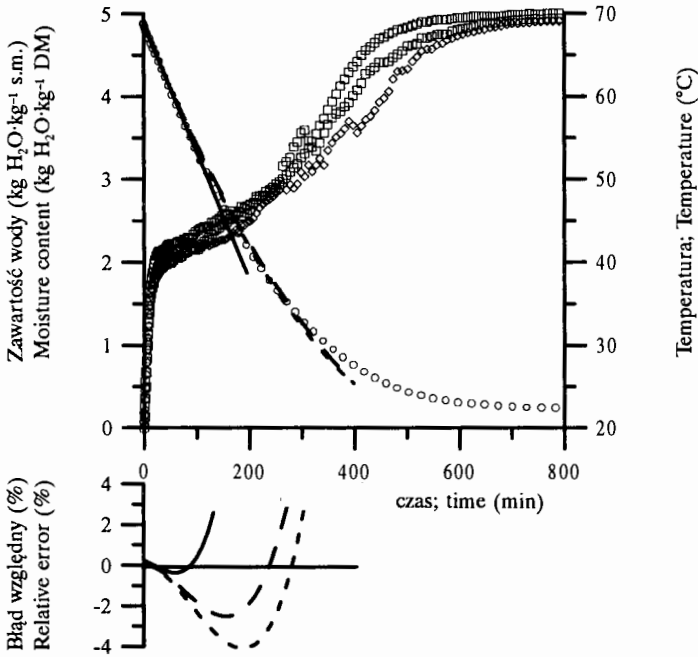
Modele pierwszego okresu suszenia Models of the first drying period	Uwzględniony model skurczu suszarniczego Shrinkage model applied
$u(\tau) = -k\tau + u_0$ (1)	nie uwzględniono; not applied
$u(\tau) = \frac{u_0}{a} \left[\left(1 - \frac{ak\tau}{3u_0} \right)^3 + a - 1 \right]$ (2)	$\frac{V}{V_0} = a \frac{u}{u_0} + 1 - a$ (3) a – parametr; parameter
$u(\tau) = \left[\frac{(2n-3)k\tau + 3u_0}{3u_0^{2n/3}} \right]^{\frac{3}{3-2n}}$ (4)	$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{u}{u_0} \right)^n$ (5) n – parametr; parameter

Występujący w modelach pierwszego okresu suszenia parametr k określa początkową szybkość suszenia. Szybkość tę wyznaczano za pomocą regresji liniowej, badając liniowość równania (1) dla funkcji aproksymującej cztery powtórzenia pomiarów zawartości wody w suszonych cząstkach, przy błędzie względnym nie większym niż 1%. Tak wyznaczona wartość początkowej szybkości suszenia wykorzystywana była we wszystkich modelach pierwszego okresu suszenia (1, 2 i 4). Założono, że modele te poprawnie opisują kinetykę suszenia, gdy wartość błędu względnego modelu liniowego (1) nie przekroczy 1%, a uwzględniających skurcz suszarniczy modeli (2) i (4), ze względu na charakter przebiegu ich błędów względnych, nie przekroczy 4%. Parametry a i n były dobierane przy użyciu programu Statistica, jako parametry występujące w równaniach (odpowiednio modelu (3) i (5)) aproksymujących punkty pomiarowe.

Wyniki i dyskusja

Modele pierwszego okresu suszenia zweryfikowano przy użyciu danych eksperymentalnych. Wartości wyznaczone z modeli pierwszego okresu suszenia porównywano z wartościami obliczonymi z funkcji aproksymującej wyniki czterech powtórzeń pomiarów zmian zawartości wody w czasie.

Analizując uzyskane wyniki modelowania (przykładowy rysunek 1) można stwierdzić, że zarówno model liniowy, jak i oba modele uwzględniające skurcz suszarniczy dobrze opisują proces. Model liniowy kończy opisywanie procesu suszenia w momencie rozpoczynania się powolnego wzrostu temperatury suszonego ciała od temperatury bliskiej temperaturze mokrego termometru. Modele uwzględniające skurcz suszarniczy kończą opisywanie procesu w momencie gwałtownego wzrostu temperatury suszonego ciała. Oba modele uwzględniające skurcz suszarniczy jednakowo dobrze opisują proces suszenia, nie można więc jednoznacznie stwierdzić, który z nich jest lepszy.



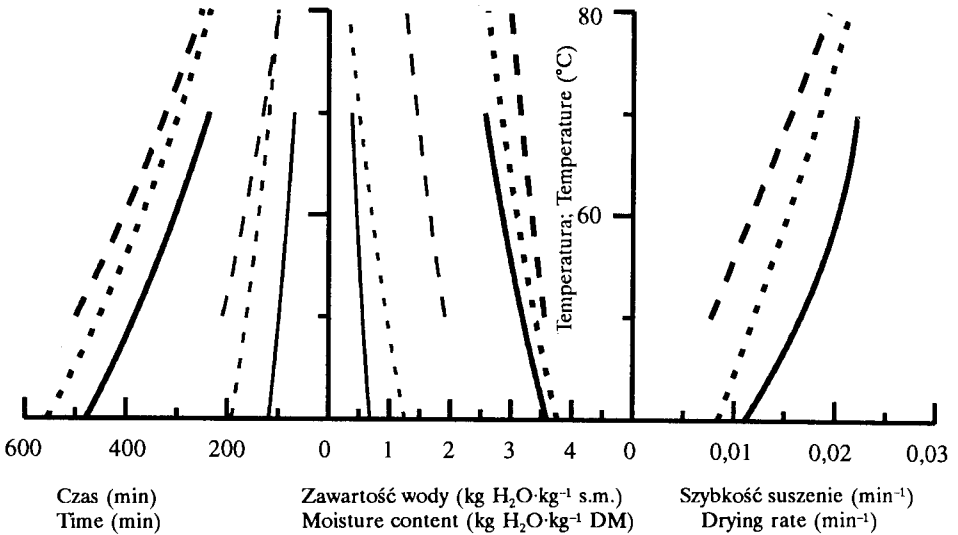
Rys. 1. Modelowanie pierwszego okresu suszenia plasterów o grubości 9 mm, krojonych w poprzek korzenia pietruszki, suszonych w temperaturze 70°C: (○) zawartość wody, (□) temperatura na powierzchni suszonego materiału, (◇) temperatura wewnątrz suszonego materiału, (—) model liniowy (1), (- -) model ze skurczem (2), (- · -) model ze skurczem (4)

Fig. 1. Modelling of the first drying period of 9 mm thick crosswise cut parsley slices dried at 70°C: (○) moisture content, (□) temperature on the dried slices surface, (◇) temperature inside the dried slices, (—) linear model (1), (- -) model with shrinkage (2), (- · -) model with shrinkage (4)

Dla wszystkich rodzajów cząstek potwierdziła się zależność, że model uwzględniający skurcz suszarniczy opisuje proces suszenia w dłuższym zakresie czasowym niż model liniowy.

Na rysunku 2 przedstawione są przebiegi czasów opisywania pierwszego okresu suszenia i wartości krytycznej zawartości wody wyznaczonych z modelu liniowego i modelu uwzględniającego skurcz suszarniczy oraz początkowej szybkości suszenia przykładowo dla plasterów poprzecznych korzenia pietruszki o różnej grubości suszonych w różnych temperaturach. Wraz ze wzrostem temperatury czynnika suszącego i zmniejszaniem się grubości cząstki skraca się czas trwania opisu procesu przez matematyczne modele pierwszego okresu suszenia, bowiem skraca się wtedy również czas trwania całego procesu. Czas opisu procesu przez model liniowy pierwszego okresu suszenia jest czasami nawet prawie czterokrotnie krótszy od czasu tego opisu przez modele uwzględniające skurcz suszarniczy. Spowodowane jest to tym, że model liniowy nie uwzględnia w opisywanym przez niego procesie zmian powierzchni wymiany ciepła i masy podczas suszenia. W przypadku korzenia pietruszki zauważono natomiast dość znaczną zmianę wymiarów cząstek w czasie ich suszenia. Dane empiryczne potwierdziły również, że szybkość suszenia zmniejsza się już od początku trwania procesu, aczkolwiek w

niektórych warunkach prowadzenia suszenia zmiana ta w początkowej fazie trwania procesu jest stosunkowo nieznaczna. W związku z tym można przyjąć, że zmniejszanie się tej szybkości w pierwszym okresie suszenia związane jest z występowaniem skurczu suszarniczego, zaś powodowane przez niego zmniejszanie się powierzchni wymiany ciepła i masy ma większy wpływ na przebieg suszenia niż, również powodowane przez skurcz, zmniejszanie się średnicy kapilar w suszonych cząstkach pietruszki i, co za tym idzie, zwiększanie ssania kapilarnego.

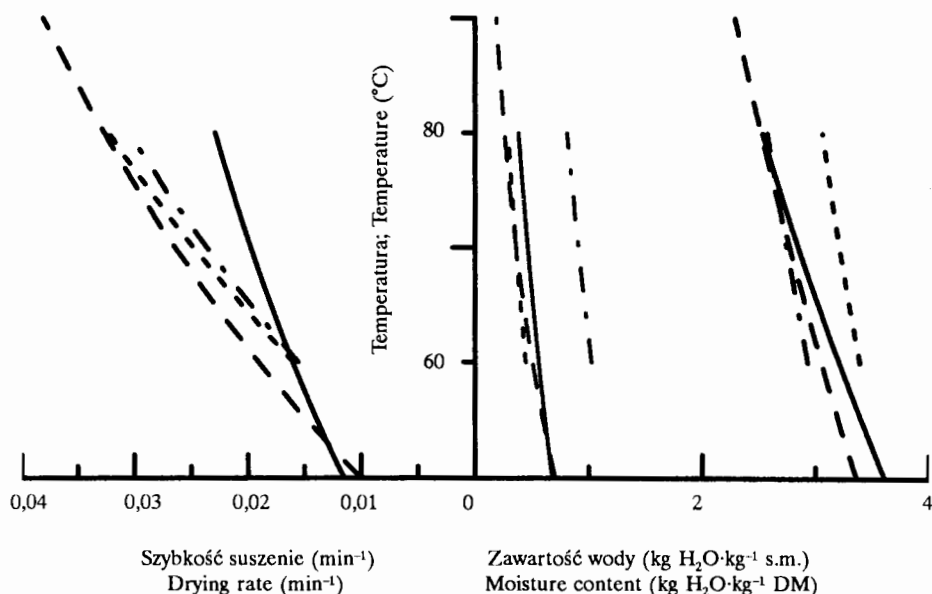


Rys. 2. Czas opisywania pierwszego okresu suszenia i krytyczna zawartość wody wyznaczone z modelu liniowego i modelu uwzględniającego skurcz suszarniczy oraz początkowa szybkość suszenia dla plasterków poprzecznych korzenia pietruszki o różnej grubości, suszonych w różnych temperaturach: (—) 3 mm, (- -) 6 mm, (- · -) 9 mm, grube linie - model liniowy (1), cieńsze linie - model ze skurczem (2)

Fig. 2. Time of describing of the first drying period and critical moisture content determined from linear model and from model taking into account shrinkage and initial drying rate for (—) 3 mm, (- -) 6 mm, (- · -) 9 mm thick crosswise cut parsley slices dried at different temperatures: thick lines - linear model (1), thinner lines - model with shrinkage (2)

Wraz ze wzrostem temperatury czynnika suszącego i zmniejszaniem się grubości cząstki zmniejsza się wartość zawartości wody uznawana za krytyczną. Porównując wartość krytycznej zawartości wody wyznaczonej przy użyciu omawianych modeli pierwszego okresu suszenia można stwierdzić, że wartość ta wyznaczona z modelu liniowego jest kilkakrotnie większa. Wiąże się to z faktem, iż modele uwzględniające skurcz opisują proces suszenia w dłuższym zakresie czasowym niż model liniowy. Na rysunku 2 widoczna jest również zależność, zgodnie z którą wraz ze wzrostem grubości cząstki maleje początkowa szybkość suszenia. Szybkość ta zależy bowiem również od powierzchni suszonego materiału, zaś wraz ze wzrostem grubości cząstek ich powierzchnia, przy tej samej objętości (masie) materiału, maleje. Ta właśnie różna, zależna od temperatury, wielkości cząstek oraz ich rodzaju, początkowa szybkość suszenia powoduje, że różne

są czasy trwania opisu procesu przez modele pierwszego okresu suszenia i różne zawartości wody uznawane za krytyczne.



Rys. 3. Krytyczna zawartość wody oraz początkowa szybkość suszenia dla różnych cząstek korzenia pietruszki o grubości 3 mm, suszonych w różnych temperaturach: (—) plaster poprzeczny, (- - -) plaster z walca osiowego, (- — -) plaster wzdłużny, (- - -) pierścien z kory, grube linie – model liniowy (1), cieńsze linie – model ze skurczem (2)

Fig. 3. Critical moisture content and initial drying rate for 3 mm thick (—) crosswise cut slice, (- - -) axial cylinder slice, (- — -) lengthwise cut slice, (- - -) ring of bark dried at different temperatures: thick lines – linear model (1), thinner lines – model with shrinkage (2)

Na rysunku 3 przedstawione są wartości początkowych szybkości suszenia oraz krytycznych zawartości wody dla różnych cząstek korzenia pietruszki o grubości 3 mm, suszonych w różnych temperaturach, wyznaczone z modelu liniowego (1) i modelu uwzględniającego skurcz suszarniczy (2). Dla wszystkich rodzajów cząstek występują analogiczne zależności jak omówione na podstawie rys. 2 dla plastra poprzecznego. Porównując zaś krytyczne zawartości wody dla różnych cząstek można zauważyć, że ich wartości, choć w różnym stopniu, to jednak różnią się od siebie, niezależnie od tego czy w modelu uwzględniony jest skurcz suszarniczy, czy nie. Wartości początkowej szybkości suszenia dla różnych cząstek również różnią się od siebie.

Wnioski

1. Można przyjąć, że w procesie konwekcyjnego suszenia cząstek korzeni pietruszki istnieje okres, w którym o przebiegu procesu decydują warunki zewnętrznej wymiany masy. Świadczą o tym zweryfikowane matematyczne mo-

- dele pierwszego okresu suszenia: model liniowy (1) z maksymalnym błędem względnym 1% i modele uwzględniające skurcz suszarniczy (2) i (4) z maksymalnym błędem względnym 4%, przy czym dla danych parametrów prowadzenia procesu modele uwzględniające skurcz suszarniczy weryfikowały się zawsze do niższej zawartości wody.
2. Zweryfikowanie modelu liniowego (1) daje podstawę do stwierdzenia, że w procesie konwekcyjnego suszenia cząstek korzeni pietruszki istnieje okres stałej szybkości suszenia.
 3. Zweryfikowane modele pierwszego okresu suszenia (2) i (4) zawierające w swojej strukturze modele skurczu suszarniczego cząstek korzeni pietruszki potwierdzają, iż można przyjąć, że malejąca szybkość suszenia w pierwszym okresie suszenia jest wynikiem skurczu suszonych cząstek.
 4. Krytyczna zawartość wody umownie rozdzielająca pierwszy i drugi okres suszenia maleje wraz ze wzrostem temperatury powietrza suszącego i spadkiem grubości cząstki oraz zależy od rodzaju cząstki korzeni pietruszki.
 5. Początkowa szybkość suszenia cząstek korzeni pietruszki rośnie wraz ze wzrostem temperatury powietrza suszącego i spadkiem grubości cząstki oraz zależy od rodzaju cząstki.
 6. Uzyskane wyniki dają podstawę do stwierdzenia, że korzeń pietruszki jest ciałem anizotropowym i heterogenicznym.

Wykaz oznaczeń

k	– początkowa szybkość suszenia (min^{-1}),
u, u_0	– zawartość wody, początkowa zawartość wody ($\text{kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.),
V, V_0	– objętość, początkowa objętość (m^3),
τ	– czas suszenia (min).

Literatura

- BUGROWA L.N. 1971. *Tiechnologija suszki bjelych korniev w vidje kubikov*. Kons. Owošć. Prom. (8): 11–13.
- DAUDIN J. D., RICHARD H.M.J. 1982. *Air drying of parsley, Petroselinum hortense Hoff*. Sciences des Aliments 2(3): 405–410.
- DOMAGAŁA A., JANUS P., WITULSKA, M., WOJDALSKI J. 1996a. *Kinetyka suszenia pietruszki w przemysłowej suszarce trójtaśmowej*. Probl. Inż. Rol. 4, 3(13): 39–46.
- DOMAGAŁA A., JANUS P., WITULSKA, M., WOJDALSKI J. 1996b. *Kinetyka suszenia pietruszki w przemysłowej suszarce pięciotaśmowej*. Probl. Inż. Rol. 4, 3(13): 47–54.
- GÓRNICKI K. 2000. *Modelowanie procesu konwekcyjnego suszenia korzeni pietruszki*. Rozprawa doktorska. SGGW, Warszawa.

- GÓRNICKI K., KALETA A. 2002. *Kinetics of convection drying of parsley root particles*. Pol. J. Food Nutr. Sci. 11/52(2): 13–19.
- MURAKOWSKI J. 1994. *Suszenie pieczarek w warunkach konwekcji naturalnej – modelowanie pierwszego okresu suszenia*. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 417: 35–50.
- PABIS S. 1965. *Suszenie płodów rolnych*. PWRiL, Warszawa: 316 ss.
- PABIS S. 1994. *Uogólniony model kinetyki suszenia warzyw i owoców w pierwszym okresie*. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 417: 15–34.
- STEHLI D., BACHMANN M.R., ESCHER F. 1988. *Trocknung von Gemüse bei natürlicher Konvektion der Trocknungsluft*. 1. *Trocknungsverlauf und Produktqualität*. Lebensm. – Wiss. u. – Technol. 21(5): 294–302.
- WITROWA-RAJCHERT D. 1999. *Rehydracja jako wskaźnik zmian zachodzących w tkance roślinnej w czasie suszenia*. Fundacja „Rozwój SGGW”, Warszawa: 81 ss.

Słowa kluczowe: suszenie konwekcyjne, matematyczny model, pietruszka

Streszczenie

W pracy przeprowadzono empiryczną weryfikację modeli kinetyki suszenia w pierwszym okresie suszenia dla cząstek korzenia pietruszki. Weryfikowano model liniowy nieuwzględniający skurczu suszarniczego oraz dwa modele uwzględniające skurcz. Na podstawie wyników weryfikacji przeprowadzono analizę badanego procesu.

MODELLING OF THE FIRST DRYING PERIOD OF PARSLEY ROOT PARTICLES

Krzysztof Górnicki, Agnieszka Kaleta
Department of Fundamental Engineering,
Warsaw Agricultural University

Key words: convection drying, mathematical model, parsley

Summary

Empirical verification of mathematical models of the first drying period of parsley root particles was conducted. Linear model not taking drying shrinkage into account and two models with shrinkage were verified. The obtained results allow for drawing the following conclusions. It could be assumed that during the convection drying of parsley root particles: 1) the period occurs during which the course of the process is determined by the conditions of external mass transfer,

2) the period of constant drying rate occurs. It could be also assumed that decreasing drying rate during the first period is caused by the drying shrinkage of dried particles. The obtained results of investigations suggest that parsley root can be regarded as an anisotropic and heterogeneous body.

Dr inż. Krzysztof **Górnicki**
Katedra Podstaw Inżynierii
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ul. Nowoursynowska 166
02-787 WARSZAWA
e-mail: gornicki@alpha.sggw.waw.pl