

LABORATORYJNE BADANIA PROCESU SUSZENIA PLASTERKÓW ZIEMNIACZANYCH

S. P. GADAJ — Polska

WSTĘP

Ze względu na duże wartości odżywcze, wysokie plony oraz małe wymagania glebowe ziemniak jest jedną z podstawowych roślin uprawnych w Polsce. Wysokie straty związane z tradycyjnym przechowywaniem ziemniaków zmuszają do stosowania innych metod konserwacji ziemniaków przeznaczonych na pasze. Jedną z nich jest suszenie krajanki ziemniaczanej w suszarniach bębnowych i przechowywanie zmielonego suszu. Wadą tej metody jest jednak wysoki koszt 1 t suszu oraz niedoskonałość technologii suszenia. Wysoki koszt produkcji suszu spowodowany jest między innymi dużym zużyciem energii cieplnej. Zbadanie podstawowych procesów zachodzących w ziemniakach podczas suszenia może przyczynić się do obniżenia kosztów suszenia.

Celem tej pracy jest zbadanie i opis procesu suszenia pojedynczych plasterków ziemniaczanych w warunkach naturalnej konwekcji przy różnych grubościach plasterków i różnych temperaturach czynnika suszącego.

Badania pojedynczych plasterków pozwalają na charakterystykę zjawiska przenikania wilgoci wewnątrz i na zewnątrz ziemniaka, umożliwiając znalezienie charakterystyk suszenia zmian zawartości wody w czasie oraz szybkości tych zmian.

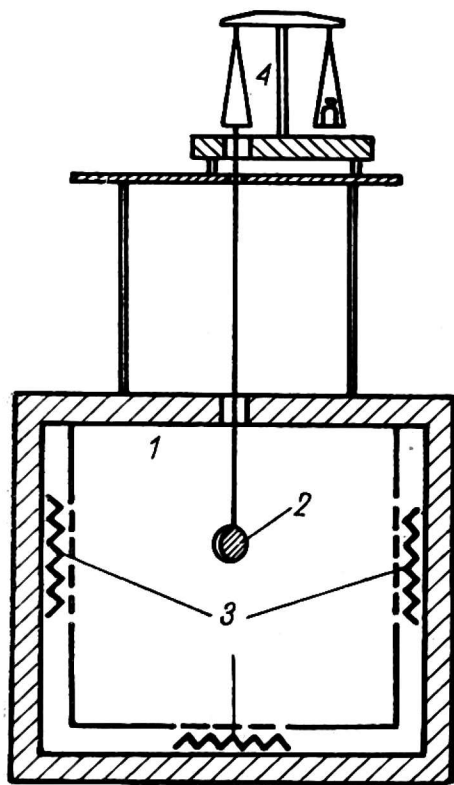
METODYKA I WARUNKI BADAŃ

Badania zmian zawartości wody w pojedynczym plasterku przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na rysunku 1. Komorę pomiarową stanowiła suszarka laboratoryjna utrzymująca temperaturę czynnika z dokładnością $\pm 2^\circ\text{C}$. Masę plasterków mierzono z dokładnością 0,05 g za pomocą wagi automatycznej ustawionej na specjalnej podstawie służącej jako osłona przed strumieniem gorącego powietrza.

Pojedyncze plasterki o określonej grubości wycinano z bulwy ziemniaka i po zważeniu zawieszano w suszarce na pręcie zamocowanym do wagi. Zmiany masy plasterka suszonego w temperaturze czynnika 105°C rejestrowano co 5 min, a w temperaturze 220°C — co 2 min. Pomiar prowadzono do momentu, gdy różnica mas dla dwu kolejnych odczytów była mniejsza od 0,1 g lub gdy ciemniała powierzchnia plasterka. Następnie dosuszano do suchej masy wszystkie plasterki w tempera-

turze 105°C . W celu umożliwienia porównywania przebiegów suszenia plasterków o różnej grubości suszonych w różnych temperaturach, wszystkie wyniki przedstawiono w postaci wielkości zredukowanych (dzieląc przez początkową zawartość wody).

Ponieważ w danej partii ziemniaków mogą znajdować się kłęby o różnej wilgotności, stopniu dojrzałości, zawartości skrobi itp., więc dla uzyskania krzywej susze-



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego
1 — komora pomiarowa, 2 — plasterk ziemniaczany, 3 — grzałki, 4 — waga

nia reprezentatywnej dla tej partii wykonywano w jednakowych warunkach pomiary zmian masy pięciu różnych plasterków i do obliczeń używano wartości średnich.

CHARAKTERYSTYKA PROCESU SUSZENIA PLASTERKÓW ZIEMNIACZANYCH

W procesie konwekcyjnego suszenia ciała stałego występują następujące zjawiska:

- przejmowanie ciepła od czynnika suszącego przez ciało stałe,
- przemiana fazowa znajdującej się w danym ciele wody na parę,
- ruch wilgoci wewnątrz ciała,
- przejmowanie wilgoci od ciała przez czynnik suszący.

Ciepło pobrane przez dane ciało wywołuje wzrost temperatury ciała oraz przemianę fazową wody. Wyznaczenie ilości ciepła pobranego przez plasterk jest niemożliwe ze względu na nieznajomość ciepła parowania wody wewnątrz plasterka. Możliwe jest tylko wyznaczenie średniej temperatury plasterka podczas suszenia w funkcji czasu.

Ruch wilgoci wewnątrz ciała wywołany jest gradientem temperatury i gradientem zawartości wody. Strumień wilgoci wewnątrz ciała można opisać według Łykowa [3] równaniem:

$$m = a_m \gamma_s (\nabla u + \delta \nabla \tau), \quad (1)$$

gdzie:

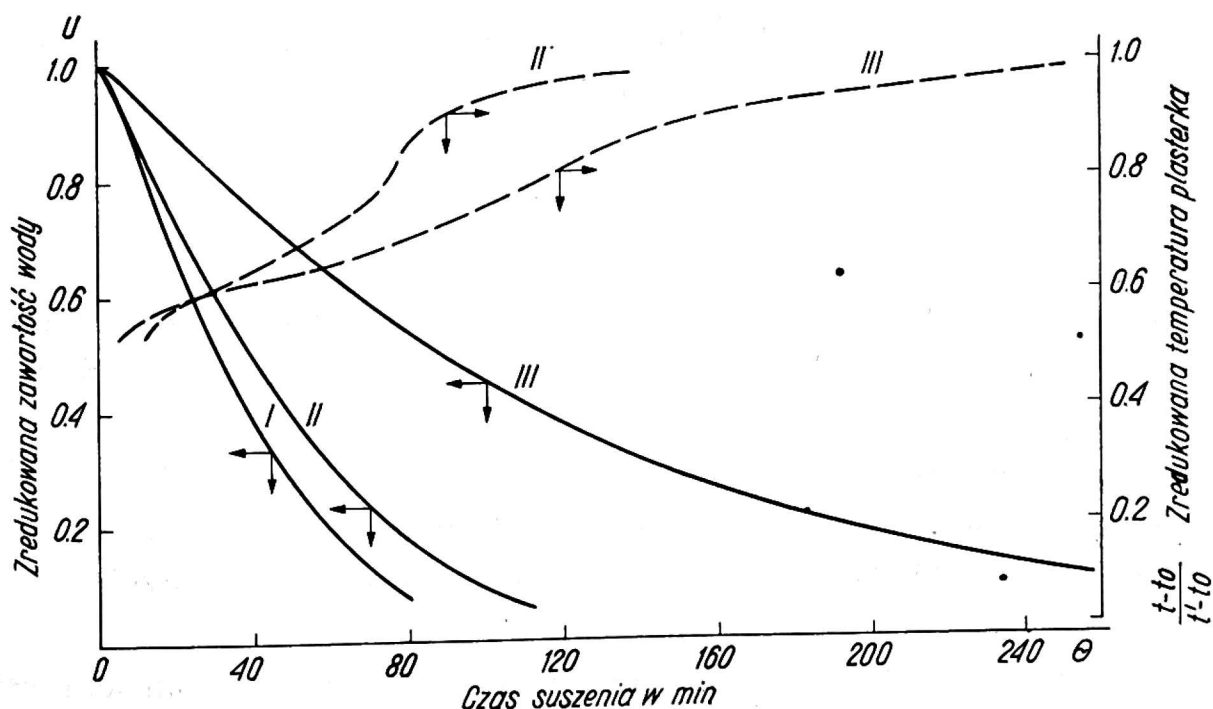
- m — strumień wilgoci,
- a_m — współczynnik dyfuzji wody,
- γ_s — masa właściwa suchej masy ciała,
- u — zawartość wody,
- δ — współczynnik termogradientury,
- τ — temperatura ciała.

Ze względu na zwrot gradientu temperatury strumień wilgoci będzie skierowany do wnętrza ciała. W przypadku dużych gradientów temperatury w warstwie powierzchniowej ciała ruch wilgoci na zewnątrz będzie utrudniony.

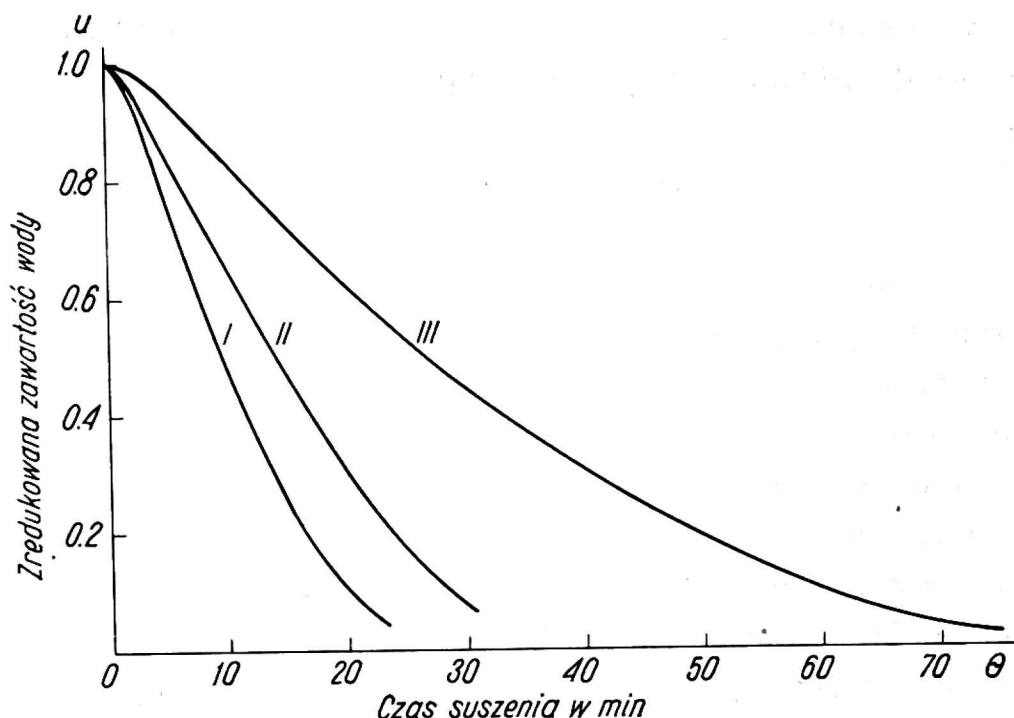
W przypadku konwekcji swobodnej przejmowanie wilgoci od ciała suszonego przez czynnik odbywa się na drodze dyfuzji pary wodnej. Podstawą ilościowego opisu tego procesu jest ciągły pomiar zmian masy ciała w czasie suszenia. Dla plasterków ziemniaczanych zmierzono zmiany zawartości wody oraz szybkość tych zmian.

WYNIKI BADAŃ PROCESU SUSZENIA I NAGRZEWANIA

Badano proces suszenia plasterków o grubościach 3,5 i 10 mm, w warunkach naturalnej konwekcji, w temperaturach czynnika 105° i 220°C. Średnia początkowa wilgotność ziemniaków wziętych do badań wynosiła 80%. Maksymalne odchylenia od wartości średniej wynosiły +4% i -5%. Krzywe suszenia przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Krzywe suszenia i nagrzewania plasterków suszonych w temperaturze 105°C
I — plasterki o grubości 3 mm, II — plasterki o grubości 5 mm, III — plasterki o grubości 10 mm



Rys. 3. Krzywe suszenia plasterków suszonych w temperaturze 220°C
 I — plasterki o grubości 3 mm, II — plasterki o grubości 5 mm, III — plasterki o grubości 10 mm

Otrzymane wyniki wskazują, że czas suszenia do danej zawartości wody wzrasta szybko ze wzrostem grubości plasterka.

Dla plasterków o grubości 5 i 10 mm suszonych w temperaturze 105°C wyznaczono przebiegi średnich temperatur plasterka. Przebiegi te przedstawiono na rysunku 2 w układzie zredukowana temperatura — czas suszenia. Pomiar temperatury plasterków o grubości 3 mm okazał się niemożliwy, ze względu na zbyt dużą długość końcówek termopar w stosunku do grubości plasterka.

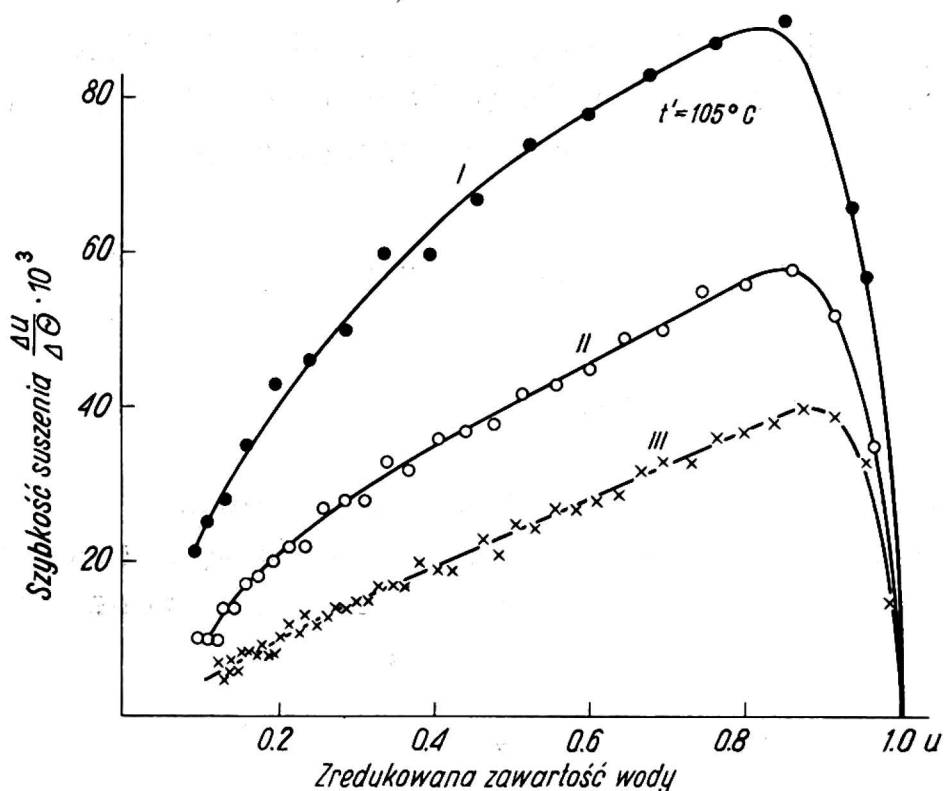
Dla wszystkich badanych plasterków wyznaczono również szybkość suszenia $\frac{\Delta u}{\Delta \theta}$. Zmiany szybkości suszenia w funkcji zredukowanej zawartości wody plasterków o różnej grubości przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

ANALIZA WYNIKÓW

Z analizy przebiegów szybkości suszenia wynika, że proces suszenia konwekcyjnego plasterków ziemniaczanych przebiega inaczej niż innych płodów rolnych.

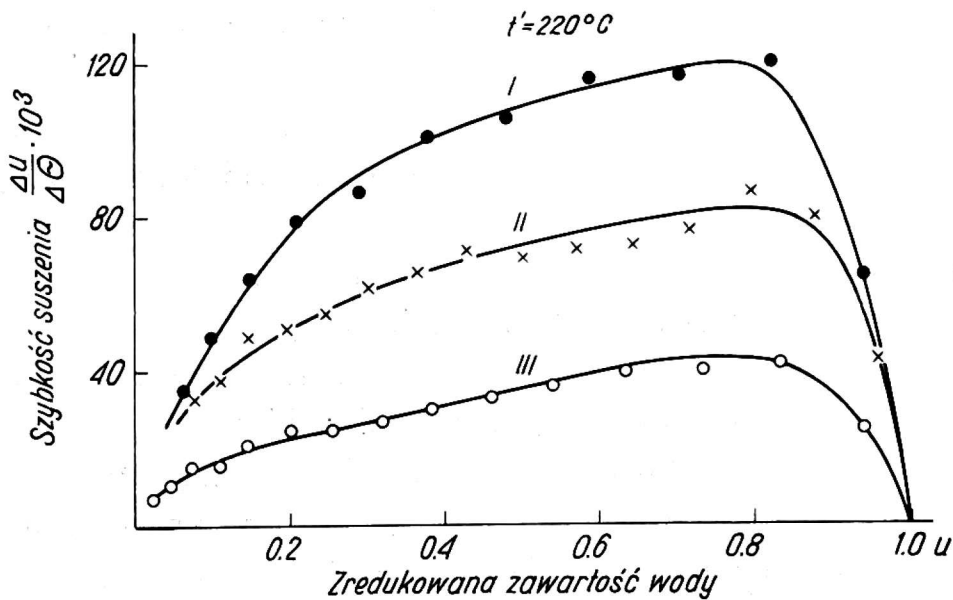
Według Łykowa [3] krzywą szybkości suszenia przedstawioną w funkcji zawartości wody można podzielić na trzy części: odcinek wzrostu szybkości suszenia związany ze wzrostem temperatury ciała, odcinek stałej szybkości suszenia — zwany pierwszym okresem suszenia oraz odcinek malejącej szybkości suszenia — zwany drugim okresem suszenia.

Obecne badania wykazują, że w przypadku plasterków ziemniaczanych nie można wyróżnić pierwszego okresu suszenia. Jak widać z rysunków 4 i 5 dla plasterków o różnych grubościach suszonych w temperaturach 105 i 220°C szybkość



Rys. 4. Szybkość suszenia plasterków w temperaturze czynnika równej $105^\circ C$ w funkcji zredukowanej zawartości wody

I — plasterki o grubości 3 mm, II — plasterki o grubości 5 mm, III — plasterki o grubości 10 mm



Rys. 5. Szybkość suszenia plasterków w temperaturze czynnika równej $220^\circ C$ w funkcji zredukowanej zawartości wody

I — plasterki o grubości 3 mm, II — plasterki o grubości 5 mm, III — plasterki o grubości 10 mm

suszenia wzrasta szybko ze zmniejszaniem się zawartości wody od zera do pewnej wielkości maksymalnej, a następnie łagodnie maleje, czyli przechodzi w drugi okres suszenia.

Brak pierwszego okresu w procesie konwekcyjnego suszenia ziemniaków potwierdzają badania I. F. Pikusa [7], przeprowadzane dla sześcianów o różnych wymiarach wycinanych z bulw ziemniaczanych.

Przebieg szybkości suszenia w funkcji zawartości wody zależy od grubości plasterka i temperatury czynnika. Dla plasterków o grubości 10 mm szybkość suszenia w drugim okresie można aproksymować za pomocą funkcji

$$\frac{du}{d\Theta} = -au, \quad (2)$$

gdzie:

u — zredukowana zawartość wody,

Θ — czas suszenia,

a — współczynnik charakteryzujący kąt nachylenia prostej.

Całkując wyrażenie (2) względem czasu otrzymuje się zależność zredukowanej zawartości wody w plasterkach ziemniaczanych od czasu w postaci wzoru:

$$u = Ae^{-a\Theta}, \quad (3)$$

gdzie A — stała całkowania.

Wzór ten jest analogiczny do uproszczonego równania krzywej suszenia otrzymanego w wyniku analizy rozwiązania równania suszarniczego, przy założeniu stałej wartości współczynnika dyfuzji masy [5].

Zmniejszanie grubości plasterka powoduje coraz większe odchylenie przebiegu szybkości suszenia w drugim okresie od przebiegu opisanego równaniem (2). Również ze wzrostem temperatury (rys. 5) przebieg szybkości suszenia wykazuje rosnące odstępstwa od przebiegu liniowego.

Wymiana wilgoci w ciele stałym jest zależna od jego temperatury. Mierzac temperaturę ciała podczas suszenia otrzymujemy informację dotyczącą wymiany ciepła i wilgoci.

Proces nagrzewania plasterków (rys. 2) można podzielić na trzy okresy. W pierwszym następuje szybki wzrost temperatury ciała. W tym czasie wysycha warstwa powierzchniowa plasterka. Na skutek dużego gradientu temperatury, a równocześnie małego gradientu zawartości wody, ruch wilgoci w kierunku powierzchni zachodzi bardzo powoli. W drugim okresie następuje dalszy wzrost temperatury plasterka przy dość szybkiej zmianie zawartości wody. W trzecim okresie następuje asymptotyczne dążenie średniej temperatury plasterka do temperatury czynnika.

Otrzymane krzywe nagrzewania wskazują również na odmienny charakter procesu suszenia ziemniaków w porównaniu z procesami suszenia innych ciał kapilarno-porowatych. Nie obserwuje się tu bowiem okresu stałej temperatury, który odpowiada okresowi stałej szybkości suszenia (ciepło pobierane przez ciało jest całkowicie zużywane na przemianę fazową wody).

W drugim okresie konwekcyjnego suszenia ciała stałego kapilarno-porowatego czynnikiem decydującym o przebiegu suszenia jest dyfuzja wilgoci. Do opisu procesu suszenia ciała stałego w tym okresie można zastosować równanie dyfuzji

$$\frac{\partial u}{\partial \Theta} = a_m \nabla^2 u, \quad (4)$$

gdzie:

u — zawartość wody,

Θ — czas suszenia,

a_m — współczynnik dyfuzji wilgoci.

Wymianę wilgoci między ciałem stałym a czynnikiem suszącym charakteryzuje liczba Biota dla wymiany masy

$$Bi_m = \frac{\alpha_m l}{\lambda_m}, \quad (5)$$

gdzie:

α_m — współczynnik przejmowania wilgoci w warstwie granicznej,

λ_m — współczynnik przewodności wilgoci wewnątrz ciała,

l — wymiar liniowy.

Liczba Biota charakteryzuje rozkład wilgoci wewnątrz ciała. W przypadku konwekcyjnego suszenia ziemniaków wewnętrzne opory ruchu wilgoci są znacznie większe w porównaniu z oporami występującymi podczas przejmowania wilgoci w warstwie granicznej. Odpowiada to bardzo dużej wartości liczby Biota, czyli można przyjąć, że $Bi_m \rightarrow \infty$.

Proces suszenia plasterków ziemniaczanych, w przypadku gdy ich grubość jest znacznie mniejsza od średnicy, można traktować jako proces suszenia płyty o nieskończonej długości i szerokości. Założenie to jest możliwe również dlatego, że wymiana wilgoci przez warstwę korkową okrywającą ściankę boczną plasterka jest bardzo utrudniona.

Równanie suszarnicze opisuje ruch wilgoci w warunkach stacjonarnych, konieczne jest więc przyjęcie założenia, że warunki wewnętrzne, kształt i wymiary plasterka nie ulegają zmianie podczas procesu suszenia. Przyjmuje się również, że na początku suszenia rozkład wilgoci w plasterku jest równomierny.

Przy tych założeniach można sformułować następujące warunki brzegowe i początkowe:

$$u(x, 0) = u_0$$

$$u(\pm R, \Theta) = u_r \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = 0,$$

gdzie:

R — połowa grubości plasterka (środek układu współrzędnych znajduje się w połowie grubości plasterka),

u_r — równoważna zawartość wody na powierzchni plasterka.

Rozwiązanie równania (4) z warunkami brzegowymi (6) po scałkowaniu względem współrzędnej jest funkcją liczby Fouriera dla wymiany masy:

$$\frac{u(\Theta) - u_r}{u_0 - u_r} = f(F_0).$$

Funkcja ta, otrzymana w postaci sumy szeregu, została stabelaryzowana dla różnych wartości współczynnika a_m [4].

Porównując krzywe suszenia otrzymane z pomiarów z krzywymi teoretycznymi dla różnych wartości współczynnika stwierdzono znaczne różnice w przebiegu tych krzywych. Różnice te zwiększają się ze wzrostem temperatury czynnika i zmniejszaniem się grubości plasterków.

Liczba Fouriera dla wymiany wilgoci zależy od współczynnika dyfuzji wilgoci, grubości płyty (plasterka) oraz czasu suszenia:

$$F_0 = \frac{a_m \Theta}{R^2}. \quad (7)$$

Różnice między przebiegami krzywych suszenia doświadczalnych i teoretycznych mogą być spowodowane nieliniową zależnością liczby Fouriera od czasu suszenia. Przyczyną tej nieliniowości jest zmienność w czasie suszenia współczynnika dyfuzji wilgoci i grubości plasterków.

Przeprowadzono badania zmiany wymiarów plasterków podczas procesu suszenia. Wykonano pomiary dla 50 plasterków. Wyniki przedstawiono w funkcji zawartości wody. Okazało się, że wymiary plasterków maleją wraz z zawartością wody. Względne zmiany powierzchni plasterka w zależności od zawartości wody można aproksymować linią prostą o równaniu

$$\frac{S}{S_0} = 0,372u + 0,628,$$

gdzie:

S_0 — początkowa powierzchnia plasterków,

u — zredukowana zawartość wody.

Wartości liczbowe współczynników prostej obliczono metodą najmniejszych kwadratów.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania stanowią etap na drodze poznania procesu suszenia krajanki ziemniaczanej. Wskazują one, że proces suszenia ziemniaków przebiega inaczej niż innych płodów rolnych. Wymiana wilgoci wewnątrz plasterków suszonych w temperaturach przekraczających 60-70°C, wskutek zniszczenia ziarn skrobi, przebiega inaczej niż u innych ciał kapilarno-porowatych. Równocześnie tworząca się na powierzchni plasterka wyschnięta warstwa miąższu utrudnia przenikanie wilgoci na zewnątrz.

LITERATURA

1. Birecki M.: Ziemniaki. PWRiL, Warszawa 1967.
2. Gadaj S. P.: Laboratoryjne badania procesu suszenia krajanki ziemniaczanej. Sprawozdanie IMER 1970.

3. Łykow A. W.: Teoria suszki Gosenergoizdat. Moskwa 1952.
4. Łykow A. W.: Teoria ciepłoprowodności. Gos. Izdat. Tiejch. Teoriet. Litier. Moskwa 1952.
5. Pabis S.: Suszenie płodów rolnych. PWRiL, Warszawa 1965.
6. Pabis S.: Zastosowanie uproszczonego analitycznego rozwiązania równania suszenia ciała stałego do obliczeń praktycznych. Roczn. Nauk rol. Ser. C, 1966, t. 68 z. 1.
7. Woprosy intensyfikacji pierienosa ciepła i masy w suszylnych i tiermiczeskich processach. Izdatielstwo „Nauka i Tiejchnika” Mińsk 1967.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ КАРТОФЕЛЬНЫХ ЛОМТИКОВ

С. П. ГАДАЙ — Польша

Резюме

Проведены исследования процесса сушки картофельных ломтиков толщиной 3,5 и 10 мм в условиях натуральной конвекции в температуре агента 105 и 220°C. В результате этих исследований получены кривые сушки и скорость сушки ломтиков. Определены также кривые нагрева ломтиков в температуре 105°C.

На основании этих исследований мы убедились, что в случае картофельных ломтиков нельзя выделить период постоянной скорости сушки. После периода повышения скорости сушки, связанной с нагревом ломтиков, наступает период понижения скорости сушки, называемый II периодом сушки.

Составление кривых сушки, полученных из опытов с решениями уравнения диффузии, приводит к выводу, что процесс сушки картофельных ломтиков не может быть, однако, описан при помощи уравнения II периода сушки. Разницы между теоретическими решениями и результатами опытов возрастают вместе с увеличением температуры агента и уменьшением толщины ломтиков.

В уравнении диффузии принимается, что толщина ломтика не подвергается изменению во время сушки. Проведенные исследования, однако, показали, что толщина ломтика является функцией влагосодержания, что может быть одной из причин разниц в результатах опытов и теоретических решений.

Анализ результатов исследований процесса сушки картофельных ломтиков указывает на сложный и отличающийся, по сравнению с другими сельскохозяйственными продуктами, характер процесса сушки картофеля.

LABORATORY EXPERIMENTS ON THE DRYING PROCESS OF ROW POTATO SLICES

S. P. GADAJ — Poland

Summary

The experiments have been carried on the drying process of potato slices 3, 5 and 10 mm thick, under conditions of natural convection at the agent temperature of 105 and 220°C. In effect of experiments have been found the drying curves and the drying rate of potato slices. The heating curves of slices at the temperature of 105°C were also calculated.

On the basis of these experiments it was stated that in the case of potato slices, it is not possible to distinguish the period of constant drying rate. Just after the period of increasing rate of drying, connected with the heating of slices, follows the period of falling rate, known as the second drying period.

Comparing the drying curves obtained, experimentally, with the solutions of moisture diffusion equation, at assumed constant value of diffusion coefficient, it was found that the process of potato slices drying can not be still described by the equation of the second drying period. The differences between theoretical solution and the experimental results rise with the agent temperature increase and reduction of the slice thickness.

In an equation of diffusion it is assumed that the slice thickness does not vary during drying. The experiments have shown however, that the slice thickness is a function of the moisture content; that may be one of the reasons causing differences between the experimental results and theoretical solutions.

The analysis of experimental results of potato slices drying process shows the complicated and different, in comparison with the other agricultural products, character of potato drying process.

DIE LABORATORISCHEN UNTERSUCHUNGEN DES TROCKNUNGSVERFAHRENS VON KARTOFFELBLÄTTER

S. P. GADAJ — Polen

Z u s a m m e n f a s s u n g

Es wurden die Untersuchungen des Trocknungsverfahrens von Kartoffelblättern mit der Dicke 3,5 und 10 mm in den Bedingungen der natürlichen Konvektion in den Temperaturen des Trocknungsmittels 105 und 220°C durchgeführt. Im Resultate dieser Untersuchungen hat man die Kurven der Trocknung und die Geschwindigkeit der Blättertrocknung bekommen. Man hat auch die Kurven der Anwärmung der Blätter in der Temperatur 105°C bestimmt.

Auf Grund dieser Untersuchungen hat man festgestellt, dass im Falle der Kartoffelblätter der Zeitabschnitt der ständigen Trocknungsgeschwindigkeit nicht zu ermitteln ist.

Nach der Zeit der Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit, welche mit der Anwärmung der Blätter verbunden ist, folgt die Zeit der sinkenden Trocknungsgeschwindigkeit, welche als Zweiter Zeitabschnitt der Trocknung genant ist.

Im Vergleich der Trocknungskurven aus den Erfahrungen mit den Lösungen der Gleichung der Feuchtediffusion bei dem vorausgesetzten ständigen Wert des Diffusionkoeffizientes hat man festgestellt, dass der Trocknungsverfahren der Kartoffelblätter mit der Gleichung des zweiten Trocknungszeitabschnittes jedoch nicht beschrieben werden kann. Die Unterschiede zwischen den theoretischen Lösungen und der Untersuchungsergebnissen steigen mit der Steigerung der Temperatur des Trocknungsmittels und Verkleinerung der Blätterdicke.

In der Diffusionsgleichung setzt man voraus, dass die Blätterdicke während der Trocknung ständig ist. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Blätterdicke die Funktion des Wassergehaltes ist, was unter anderen die Ursache der Unterschiede zwischen den Untersuchungsergebnissen und theoretischen Lösungen sein kann.

Die Analyse der Untersuchungsergebnisse des Trocknungsverfahrens von Kartoffelblättern zeigt auf den komplizierten und anderen, im Vergleich mit den übrigen landwirtschaftlichen Produkten, Charakter des Kartoffeltrocknungsverfahrens.