

УДК 536.6 : 664.8.047: Гриби

EXPERIMENTAL AND STATISTICAL MODELING OF THE DRYING OF HATS AND STEMS OF CHAMPIGNONS

O. Yeshchenko, T. Roman, A. Mazurenko

National University of Food Technologies

Key words:

*Champignon
Drying
Experimental and
statistical modeling
Regression analysis
Thermal and physical
characteristics*

Article history:

Received 13.04.2016

Received in revised form
24.04.2016

Accepted 15.05.2016

Corresponding author:

T. Roman

E-mail:

npuht@ukr.net

ABSTRACT

The generalized experimental and statistical models of the drying process of hats and stems of the cultivated champignon mushrooms are presented in the article. This data can be used for the prediction of quality indicators of a ready semi-finished product and energy consumption for its production. The models are constructed on the basis of the results of active experiments on determining the heat of moisture evaporation from the tissues of mushroom stems and hats. The coefficients of the regression equations were defined and the connection between these coefficients and thermal and physical characteristics of water was established. The response surfaces received on the basis of the models showed that the processes of drying mushroom stems and hats have significant differences.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ШАПИНКИ І НІЖКИ ГРИБА ШАМПІНЬОНА

О.А. Єщенко, Т.О. Роман, О.Г. Мазуренко

Національний університет харчових технологій

У статті наведено узагальнені експериментально-статистичні моделі процесу сушіння ніжки та шапинки культивованого гриба шампінйон, які можуть бути використані для прогнозування якісних показників готового грибного напівфабрикату і енерговитрат на його отримання. Моделі побудовано за результатами активних експериментів з визначення теплоти випаровування вологи з тканин ніжки та шапинки гриба, на підставі яких були визначені коефіцієнти регресійних рівнянь і встановлено зв'язок між цими коефіцієнтами й теплофізичними характеристиками води. Поверхні відгуку, отримані на основі моделей, показали, що процеси сушіння ніжки та шапинки мають між собою суттєві відмінності у перебігу процесу.

Ключові слова: шампінйон, сушіння, експериментально-статистичне моделювання, регресійний аналіз, теплофізичні характеристики.

Постановка проблеми. Конвективне сушіння харчових продуктів є одним із найефективніших способів для підготовки до тривалого зберігання та подальшої переробки напівфабрикатів.

Перебіг процесів сушіння харчових продуктів і витрат енергії на їх реалізацію залежать від багатьох факторів, вплив більшості з яких неможливо відстежити в реальному часі. У зв'язку з цим аналіз і прогнозування ступеня впливу окремих факторів, а отже, в підсумку, керування перебігом процесу сушіння, доцільно здійснювати з використанням математичних моделей.

Враховуючи різноманітність властивостей харчових продуктів і складність аналітичного опису процесів їх сушіння, найбільш точно і кількісно взаємозв'язки між вхідними та вихідними параметрами обробки конкретного продукту відображають моделі, одержані експериментально-статистичним методом.

Мета дослідження. На основі даних, отриманих методом активного експерименту [1], побудувати експериментально-статистичну модель процесу сушіння шапинки та ніжки гриба шампінйон, придатну для прогнозування якісних показників готового продукту й енергетичних витрат на його отримання.

Матеріали і методи дослідження. Об'єктом дослідження є процес сушіння штучно культивованого гриба *Agaricus bisporus* (шампінйон двоспоровий). Для отримання і перевірки математичної моделі процесу сушіння, яка описує в кількісній формі взаємозв'язки між вхідними (температура і початкова вологість) та вихідними (кінцева вологість і теплота випаровування) параметрами використані методи регресійного й кореляційного аналізу.

Витрати теплоти випаровування вологи з гриба в процесі конвективно-кондуктивного сушіння визначались за допомогою диференціального мікрокалориметра випаровування ДМКВ-1 [2].

Для експериментів використовували зрізи тканин товщиною близько 1 мм окремо шапинки та ніжки плодового тіла гриба шампінйон. Початкову вологість зразків визначали шляхом їх досушування в калориметрі при температурі 105°C до постійної маси.

За допомогою перетворювачів теплового потоку (ПТП) установки вимірювали різницю між тепловими потоками (рис. 1), що йдуть від калориметричної платформи в комірці з досліджуваним зразком та еталоном. Різниця цих теплових потоків відповідає потужності ПТП, що підводиться до досліджуваного зразка, необхідної для фазового переходу рідини у пару [3].

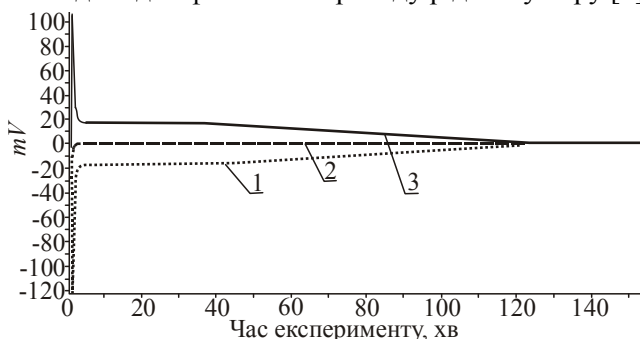


Рис. 1. Теплові потоки процесу сушіння зразка на установці ДМКВ-1:
1 — ПТП дослідного зразка; 2 — ПТП еталону; 3 — диференціальний ПТП

Температура проби досліджуваного зразка підтримувалась за допомогою електричного нагрівача та дорівнювала температурі повітря в робочій камері. Сушіння зразків закінчували при досягненні ними рівноважної вологості. Зміни маси зразка в процесі дослідження безперервно контролювались за допомогою аналітичних ваг і автоматично записувались на комп'ютер, оснащений спеціальним програмним забезпеченням.

Усі фактори, що впливають на процес, можна поділити на три групи [4]:

- контрольовані і керовані — це фактори, для яких можна не тільки зареєструвати їх рівень, але ще і задати в кожному конкретному досліді будь-яке його можливе значення;

- контрольовані, але некеровані чинники — це чинники, рівні яких можна тільки реєструвати, але задати у кожному досліді їх певне значення практично неможливо;

- неконтрольовані — це фактори, рівні яких не реєструються експериментатором і про існування яких він навіть може і не підозрювати.

До контрольованих і керованих факторів відноситься температура сушіння, яку в процесі експерименту змінювали від 40 °С до 80 °С з кроком 10 °С.

До контрольованих і некерованих факторів відноситься маса і вологість зразка, а також кількість теплоти, необхідної для випаровування вологи з продукту.

Неконтрольовані параметри в процесі моделювання не враховувались.

Процес сушіння можна вивчати й аналізувати, змінюючи вхідні впливи (фактори) і спостерігаючи за виходами (відгуками) (рис. 2). Вхідними параметрами визначимо температуру досліджуваного зразка і його вологість. Вихідним параметром буде теплота випаровування. Сутністю моделювання є виявлення наявності залежності між вологістю w й теплою випаровування r при заданих температурах t , а завданням — побудова математичної моделі цієї залежності у вигляді функціоналу

$$r(t) = f(w(t), t). \quad (1)$$



Рис. 2. Процес сушіння гриба за факторами і відгуками

Результати і обговорення. Аналітичну залежність (1) шукали методом регресійного аналізу.

Регресійний аналіз — метод моделювання вимірюваних даних і дослідження їх властивостей. Дані складаються з пар значень залежної змінної (відгуку) і незалежної змінної (фактору). Регресійна модель є функцією незалежної змінної. Параметри моделі визначають з умов мінімізації відносної похибки

$$\varepsilon = \max_i \left(\frac{|y_i^o - y_i^M|}{y_i^o} \right) \cdot 100\% \rightarrow \min, \quad (2)$$

де y^o , y^m — відповідно, результати експериментальних вимірювань теплоти випаровування й отримані результати моделювання; \bar{y}^o , \bar{y}^m — середні значення, відповідно, експериментальних вимірювань і результатів моделювання.

Ще одним критерієм якості наближення [5] є коефіцієнт кореляції

$$R^{o-m} = \frac{\sum_i (y_i^o - \bar{y}^o)(y_i^m - \bar{y}^m)}{\sqrt{\sum_i (y_i^o - \bar{y}^o)^2 \sum_i (y_i^m - \bar{y}^m)^2}}, \quad (3)$$

який показує ступінь взаємозв'язку між експериментальними вимірюваннями і результатами моделювання. R^{o-m} представляє собою безрозмірну величину, що змінюється від -1 до 1 . При незалежному варіюванні змінних, коли зв'язок між ними відсутній, $R^{o-m} = 0$. При цьому додатні значення R^{o-m} вказують на позитивний (прямий) зв'язок (тобто при збільшенні значень однієї змінної в середньому зростає значення і другої змінної), а від'ємні — на негативний (зворотний) зв'язок (при зростанні однієї змінної інша зменшується).

Регресійні залежності теплоти випаровування $r_i(w(t))$ від вологості $w(t)$ при фіксованій температурі t за даними лабораторних експериментів [1] отримали за допомогою програми CurveExpert 1.3:

$$r_i(w(t)) = a e^{-\frac{(b-w(t))^2}{2c^2}}. \quad (4)$$

Значення коефіцієнтів a , b , c рівняння (4) для ніжки (n) та шапинки (m) наведені у табл. 1 і 2.

Таблиця 1. Значення параметричних коефіцієнтів рівняння регресії для ніжки гриба шампінйона

Параметричний коефіцієнт	Температура, °C				
	40	50	60	70	80
a_n	2639,0813	2602,07	2547,772	2498,958	2455,558
b_n	46,958819	46,4943	47,67273	46,00194	46,88827
c_n	180,50002	169,311	187,1412	205,4761	208,7901

Таблиця 2. Значення параметричних коефіцієнтів рівняння регресії для шапинки гриба шампінйона

Параметричний коефіцієнт	Температура, °C				
	40	50	60	70	80
a_m	2661,28	2622,01	2583,144	2563,155	2518,272
b_m	39,70399	35,7606	28,95223	26,8682	7,579714
c_m	146,3128	185,146	235,5848	228,5341	416,2074

З результатів аналізу рис. Звпливає, що одержані статистично-регресійні моделі з достатньою точністю описують експериментальні дані. Так, коефіцієнти кореляції та відносні похибки для ніжки гриба становлять відповідно: $R_n^{o-m} \geq 0,887$ та $\varepsilon_n^{o-m} \leq 1,35\%$, а для шапинки — $R_m^{o-m} \geq 0,943$ та $\varepsilon_m^{o-m} \leq 1,84\%$.

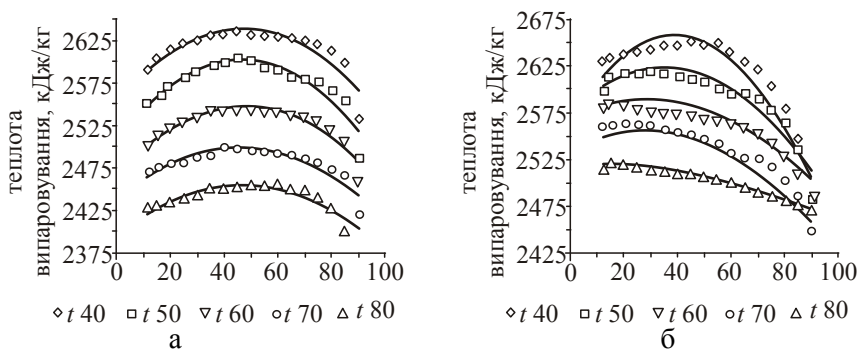


Рис. 3. Залежності зміни теплоти випаровування від вологості при різних температурах у процесі сушіння гриба шампінйона за експериментальними даними і моделлю: а — ніжки, б — шапинки

Оскільки коефіцієнти a , b , c (табл. 1, 2) є функціями температури, то виконавши апроксимацію (рис. 4, 5, 6):

a лінійним рівнянням —

$$a(t) = a_1 t + a_0; \tag{5}$$

b і c поліномами 4-го степеня —

$$b(t) = b_4 t^4 + b_3 t^3 + b_2 t^2 + b_1 t + b_0, \tag{6}$$

$$c(t) = c_4 t^4 + c_3 t^3 + c_2 t^2 + c_1 t + c_0, \tag{7}$$

отримуємо узагальнену модель процесу сушіння культивованого гриба шампінйона, що містить рівняння (4)—(7).

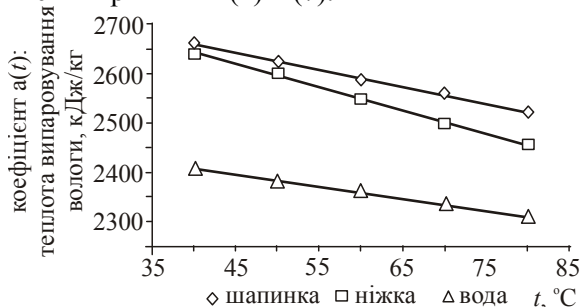


Рис. 4. Залежності коефіцієнтів a для ніжки і шапинки гриба шампінйона від температури порівняно з теплою випаровування чистої води

З результатів аналізу даних, наведених на рис. 4, випливає, що залежності коефіцієнтів a_n та $a_{ш}$ від температури відповідають (коефіцієнти кореляції, відповідно: $R_n^{a_n-H_2O} = 0,995$ та $R_{ш}^{a_{ш}-H_2O} = 0,999$) закону зміни теплоти випаровування води.

При цьому для ніжки й шапинки гриба коефіцієнти кореляції значень b_n та $b_{ш}$ (рис. 5), c_n та $c_{ш}$ (рис. 6) з теплопровідністю і теплоємністю води становлять, відповідно: $R_n^{b_n-H_2O} = -0,998$ та $R_{ш}^{b_{ш}-H_2O} = -0,882$, $R_n^{c_n-H_2O} = 0,914$ і $R_{ш}^{c_{ш}-H_2O} = 0,925$.

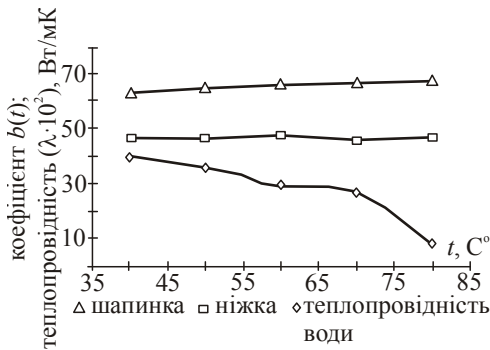


Рис. 5. Залежності коефіцієнтів b для ніжки і шапинки гриба шампінйона від температури порівняно з коефіцієнтом теплопровідності чистої води

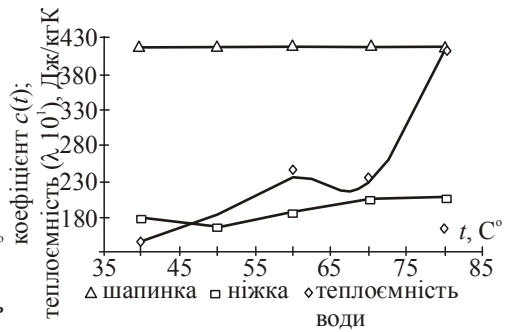


Рис. 6. Залежності коефіцієнтів c для ніжки і шапинки гриба шампінйона від температури порівняно з коефіцієнтом теплоємності чистої води

Рівняння (4)—(7) представляють узагальнену модель процесу сушіння ніжки та шапинки гриба шампінйона для довільного діапазону температур. Результати обчислювального експерименту за цією моделлю наведені на рис. 7.

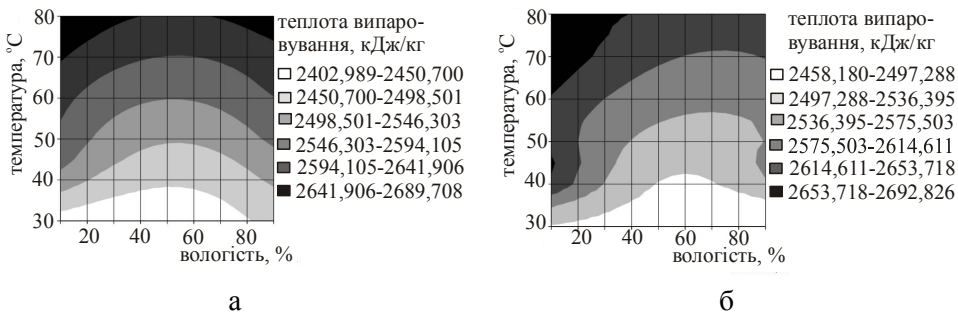


Рис. 7. Лінії рівня узагальненої моделі для довільного діапазону температур: а — ніжка, б — шапинка

Як видно з рис. 3 та 7, процеси сушіння ніжки та шапинки мають суттєві відмінності у перебігу процесу, що пов'язано з перевищенням величини теплоти випаровування вологи з гриба шампінйон над значенням випаровування чистої води на 9—10 % для шапинки і на 6—9 % - для ніжки.

Висновки

Отримані експериментально-статистичні моделі процесу сушіння культивованого гриба шампінйон описують перебіг процесу в сушарці з похибкою, що не перевищує 1,35 %, і можуть бути використані для прогнозування якісних показників готового напівфабрикату й енерговитрат на його отримання.

Виявлена спорідненість коефіцієнтів параметричних рівнянь експериментально-статистичної моделі процесу сушіння гриба з теплофізичними характеристиками води, що сприяє розширенню уявлення про зневоднення харчових продуктів.

Виявлена відмінність процесів сушіння шапинки та ніжки досліджуваного продукту вказує на необхідність розділення гриба на дві окремі сушені частини.

Література

1. Роман Т.О. Дослідження відмінностей теплових і хімічних властивостей між шапинкою та ніжкою гриба шампінйон // Т.О. Роман, О.А., Єщенко М.Г. Іванченко, О.Г. Мазуренко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — 2016. — Т. 22, № 3. — С. 231—238.
2. Патент України № 84075 МПК G01N 25/26, G01N25/28. Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів / Єщенко Ю.Ф., Декуша Л.В., Дубовікова Н.С., Грищенко Т.Г., Воробйов Л.Й., Боряк Л.А. — Заявка № а200613266 від 15.12.2006.
3. Роман Т.О. Дослідження випаровування води із тканини гриба печериця в процесі сушіння // Т.О. Роман, О.Г. Мазуренко, Н.В. Дмитренко, Л.В. Декуша // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — 2014. — Т.20, № 2. — С. 208—214.
4. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Конспект лекций (отдельные главы из учебника для вузов) // Н.А. Спирин, В.В. Лавров. Под общ. ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. — 257 с.
5. Дрейтер Норманн, Смит Гарри. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия (AppliedRegression Analysis). — 3-е изд. — Москва: «Диалектика», 2007. — 912 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ШЛЯПКИ И НОЖКИ ГРИБА ШАМПИНЬОН

О.А. Єщенко, Т.А. Роман, А.Г. Мазуренко

Национальный университет пищевых технологий

В статье приведены обобщенные экспериментально-статистические модели процесса сушки ножки и шляпки культивируемого гриба шампінйон, которые могут быть использованы для прогнозирования качественных показателей готового полуфабриката и энергозатрат на его получение. Модели построены на основе результатов активных экспериментов по определению теплоты испарения влаги из тканей ножки и шляпки гриба. Определены коэффициенты регрессионных уравнений и установлена связь между этими коэффициентами и теплофизическими характеристиками воды. Поверхности отклика, полученные на основе моделей, показали, что процессы сушки ножки и шляпки имеют существенные различия в ходе процесса.

Ключевые слова: шампінйон, сушка, экспериментально-статистическое моделирование, регрессионный анализ, теплофизические характеристики.