

*В.В. Шутюк, доктор технічних наук, доцент
Національний університет харчових технологій
С.М. Василенко, доктор технічних наук, професор
Національний університет харчових технологій
Ю.О. Дашковський, к.т.н., старший науковий співробітник
Інститут продовольчих ресурсів*

ІНЖЕНЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ ПРОДУКТІВ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО СПОСОБУ ПІДВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Моделювання комбінованих способів сушіння продуктів рослинного походження пов'язано з складністю процесів, що відбуваються під час сушіння пористих середовищ, та значною кількістю параметрів, потрібних для однозначного визначення їх фізичного стану. У статті наведена інженерна модель комбінованих способів сушіння, що дає можливість за спрощення розрахункової процедури зберегти строгість та фізичну обґрунтованість моделі та відповідних результатів аналізу. У рамках моделі суцільного середовища розглянуто математичну модель комплексного сушіння рослинної сировини конвективним і мікрохвильовим способами підведення теплоти до висушуваного продукту. В основі цієї фізичної моделі лежить поняття локальної термодинамічної рівноваги та законів перенесення в «квазігомогенному» наближенні. Для замикання цієї моделі вводилися поля потенціалів перенесення та відповідні їм «ефективні коефіцієнти перенесення».

Числове розв'язання задачі, виконане з використанням методу Рунге–Кутти, дозволило визначити відносний вплив окремих факторів на інтенсивність процесу сушіння. Для порівняльного аналізу також розв'язували задачу для деяких так званих «модельних» матеріалів, що відрізняються від «базових» лише транспортними характеристиками.

Ключові слова: *моделювання, мікрохвильове сушіння, конвекція, перегріта пара, харчові продукти*

*V.V. Shutyuk, Doctor of technical Sciences, associate Professor
National University of Food Technologies
S.M. Vasylenko, Doctor of technical Sciences, Professor
National University of Food Technologies
Yu.O. Dashkovskiy, Candidate of technical Sciences, Senior Research Fellow
The Institute of Food Resources of NAAS*

MODEL ENGINEERING OF COMBINED DRYING OF CAPILLARY-POROUS PRODUCTS USING MICROWAVE ENERGY

Modelling of combined methods of drying plants is characterized by the complexity of processes that occur during drying of porous materials and a large number of parameters needed for unambiguous determination of their physical condition. The article overviews the engineering model of combined methods of drying, which allows by means of the simplification of the calculating procedures to preserve the rigidity and physical validity of the model as well as relevant analysis results. Within the continuum model the mathematical model of combined plant drying using convection and microwave energy has been considered. This physical model is based on the notion of local thermodynamic equilibrium and heat transfer laws of quasi-homogenous approximation. For the model completing transfer potential fields and the corresponding «effective transfer coefficients» were introduced.

Calculations were done using the Runge–Kutta method, which ensured determining of the relative effect of individual factors on the intensity of the drying process. Comparative analysis

included the solution of the problem concerning some so-called «model» materials, which differ from «basic» ones only by in transfer characteristics.

Keywords: *modelling, microwave drying, convection, superheated steam, food products.*

В.В. Шутюк, доктор технических наук, доцент,
Национальный университет пищевых технологий
С.М. Василенко, доктор технических наук, профессор,
Национальный университет пищевых технологий
Ю.А. Дашковский, к.т.н., старший научный сотрудник,
Институт продовольственных ресурсов

ИНЖЕНЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО СУШКИ КАПИЛЛЯРНОГО-ПОРИСТЫХ ПРОДУКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОВОЛНОВОЙ СПОСОБА ПОДВОДА ЭНЕРГИИ

Моделирование комбинированных способов сушки продуктов растительного происхождения связано со сложностью процессов, происходящих во время сушки пористых сред, большим количеством параметров необходимых для однозначного определения их физического состояния. В статье приведена инженерная модель комбинированных способов сушки, которая позволяет упростить процедуру расчета, но при этом сохранить строгость и физическую обоснованность модели и соответствующих результатов анализа. В рамках модели сплошной среды рассмотрена математическая модель комплексной сушки растительного сырья конвективным и микроволновым способами подвода теплоты к высушиваемому продукту. В основе этой физической модели лежит понятие локального термодинамического равновесия и законе переноса в «квазигомогенном» приближении. Для замыкания этой модели вводили поля потенциалов переноса и соответствующие им «эффективные коэффициенты переноса».

Числовое решение задачи выполняли с использованием метода Рунге-Кутты, что позволило определить относительное влияние отдельных факторов на интенсивность процесса сушки. Для сравнительного анализа также решали задачу для некоторых так называемых «модельных» материалов, отличающихся от «базовых» только транспортными характеристиками.

Ключевые слова: *моделирование, микроволновая сушка, конвекция, перегретый пар, пищевые продукты*

Постановка проблеми. Складність процесів, що відбуваються під час сушіння пористих середовищ, та значна кількість параметрів, потрібних для однозначного визначення їх фізичного стану, зумовлює складність замикання тривимірної спряженої задачі. В більшості випадків неможливість з достатньою точністю визначити фізичні характеристики середовища та його транспортні характеристики (передусім, коефіцієнти перенесення) зводять нанівець зусилля з ускладнення моделей, які, здавалось би, повинні забезпечити високу точність та адекватність розв'язання задачі.

В цьому сенсі найперспективнішим можна вважати шлях, що ґрунтується на загальних фізичних основах теорії тепломасоперенесення. Цей шлях полягає в моделюванні окремих явищ і процесів на системах з гранично спрощеною геометрією пористого тіла для строго контрольованих та можливо спрощених зовнішніх умов. Таке моделювання можна назвати інженерним, оскільки воно дає можливість за спрощення розрахункової процедури зберегти строгість та фізичну обґрунтованість моделі та відповідних результатів аналізу.

Основні вимоги до інженерних моделей такі:

– можливість їх реалізації з використанням доступного у виробничих умовах інформаційно-комп'ютерного забезпечення.

– максимально можлива достовірність результатів аналізу.

В цих умовах найдієвішим заходом є застосування одновимірних моделей, замикання яких здійснюється емпіричними залежностями для визначення локальних інтенсивностей теплоперенесення від сушильного агента до поверхні поділу «пористе тіло – сушильний агент».

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні більшість аналізів процесів перенесення базуються на фізичній моделі одноконтинуумного суцільного середовища в інтерпретаціях *S. Whitaker*'а та О.В.Ликова [6, с. 1–14; 15, с. 119–203]. Ці дослідники заклали концептуальну базу всіх подальших досліджень із сушіння капілярно-пористих тіл. В основі цієї фізичної моделі лежить поняття локальної термодинамічної рівноваги та законі перенесення в «квазігомогенному» наближенні. Для замикання цієї моделі вводилися поля потенціалів перенесення та відповідні їм «ефективні коефіцієнти перенесення». Слід значити, що останні не є фізичними властивостями, а лише деякими феноменологічними величинами, покликаними узагальнити спільну дію складних механізмів перенесення.

Перенесення вологи в капілярно-пористому тілі можна розглядати як суперпозицію різних фізичних механізмів: концентраційної дифузії та конвективного перенесення. Концентраційну дифузію, в свою чергу, можна представити як суперпозицію молекулярної дифузії, кнудсенівської дифузії [2, с. 121–134; 4, с. 52–60], капілярної дифузії. Конвективний потік являє собою фільтраційний потік Дарсі.

Важливим аспектом формулювання моделей в рамках локальної рівноваги є задання умов цієї рівноваги. Якщо, наприклад, для негігроскопічних тіл умову рівноваги можна задати рівнянням Клапейрона, то для гігроскопічних середовищ тиск пари є функцією як температури, так і вологості, який традиційно задається ізотермами сорбції. На сьогодні, такі залежності не розроблені ні теоретично, ні експериментально для більшості пористих матеріалів. Stanish та ін. [11, с. 1305–1310], Ni та ін. [8, с. 1503–1509] використовували ізотерми для сушіння деревини та картоплі. Wang [12, с. 4235–4239; 13, с. 1859–1865; 14, с. 777–780], Chen [3, с. 1303–1309] використовували рівняння Кельвіна. Millman та ін. [7, с. 1597–1601] застосовували для описання сорбційних ефектів рівняння швидкості адсорбції першого порядку, а Liapis та ін. [5, с. 146–153] використовували рівняння Ленгмюра з постійною, визначеною експериментально. При низьких тисках водяна пара та газ ведуть себе як ідеальні гази. Слід зауважити, що для розчинів слід знати вплив концентрації на парціальний тиск [1, с. 122–124; 9, с. 15–28]. При цьому необхідно вводити поняття активності води.

Розроблення одновимірної математичної моделі процесу сушіння харчових продуктів комбінованим способом.

Останніми роками все більший інтерес викликають так звані «комбіновані» методи сушіння, які уможливають позитивне використання різних способів підведення енергії, в тому числі мікрохвильового, в процесі сушіння пористих матеріалів.

Використання мікрохвильового способу підведення енергії в процесі сушіння продуктів рослинного походження – перспективний спосіб отримання якіснішої продукції за короткий час. Відповідно значна увага приділяється моделюванню процесу мікрохвильового сушіння харчових продуктів.

У рамках моделі суцільного середовища розглянемо математичну модель комплексного сушіння рослинної сировини конвективним і мікрохвильовим способами підведення теплоти до висушуваного продукту. Як основне наближення моделі припускають, що пористе висушуване тіло є умовно гомогенним («квазіоднорідним»). При цьому складні процеси тепломасоперенесення в багатофазному середовищі умовно описуються рівняннями перенесення в однофазному нестисливому «квазітвердому» середовищі з використанням так званих «ефективних» коефіцієнтів перенесення за таких припущень:

- продукт однорідний;
- на початку процесу температура постійна та вміст вологи рівномірно розподілений в об'ємі продукту;

- під час сушіння температура повітря всередині камери залишається постійною;
- випаровування відбувається тільки на поверхні продукту;
- одновимірна модель адекватно описує кінетику сушіння (товщина продукту значно менша від його поздовжніх розмірів $L \gg Y$).

Схема фізичної позонної моделі показано на рис. 1.

Диференціальні рівняння перенесення

Застосуємо метод *позонного моделювання* (інтервально-ітераційний або дискретно-локальний).

Для моделювання продукт по товщині поділений на n шарів завтовшки δy_i кожен. Диференціальне рівняння збереження енергії в загальному вигляді з урахуванням теплоперенесення лише механізмом теплопровідності в y -напрямку в межах припущень моделі може бути записано як

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial y} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_{mw}(W, y, \tau), \quad (1)$$

де T – температура продукту, К (°С); c – теплоємність продукту, Вт/(кг·К); λ_{eff} – «ефективна» теплопровідність, Вт/(м·К); ρ – середньозважена густина висушуваного продукту, кг/м³; τ – час, с; W – вологовміст продукту, кг води/кг продукту.

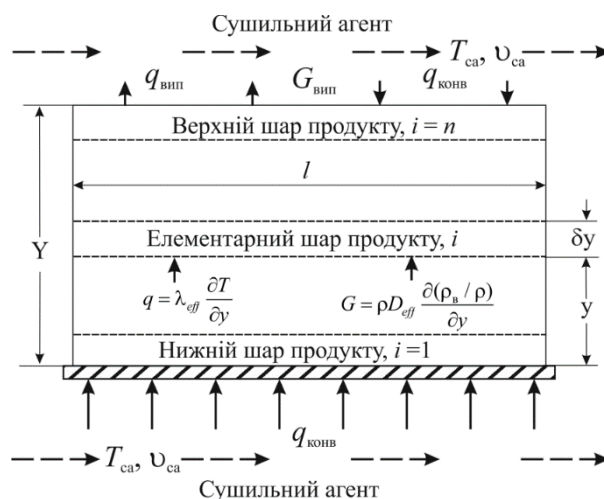


Рис.1. Схема фізичної позонної моделі комбінованого сушіння

Потужність внутрішнього джерела енергії q_{mw} в правій частині рівняння визначається інтенсивністю розсіювання мікрохвильового випромінювання та може бути визначений як

$$q_{mw}(W, y, \tau) = 2Q_{mw} \beta \exp[-2\beta(\delta - y)], \quad (2)$$

де Q_{mw} – потужність мікрохвильового випромінювача сушильної камери, Вт/м³; β – коефіцієнт затухання, який визначається виходячи з діелектричних властивостей висушуваного продукту [10, с. 60–84],

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_{mw}} \sqrt{\frac{\epsilon' \left\{ \left[1 + (\epsilon'' / \epsilon')^2 \right]^{1/2} - 1 \right\}}{2}}, \quad (3)$$

ϵ' – відносна діелектрична проникність; ϵ'' – коефіцієнт втрат; ϵ''/ϵ' – тангенс кута втрат (ϵ' і ϵ'' залежать від температури продукту, вологовмісту і густини продукту); λ_{mw} – довжина хвилі випромінювання, м;

Рівняння масоперенесення вологи дифузійною в межах прийнятих припущень набуває вигляду

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_{eff} \frac{\partial (\rho_B / \rho)}{\partial y} \right), \quad (4)$$

де ρ_B – густина вологи, кг/м³; D_{eff} – «ефективний» коефіцієнт дифузії вологи у висушуваному продукті, м²/с.

Значення ефективних коефіцієнтів перенесення на межі між i -м та $(i + 1)$ -м шарами, виходячи принципу «адитивності транспортних опорів» (термічного опору та дифузійного опору).

$$\frac{\delta y_i}{\lambda_{eff\ i}} + \frac{\delta y_{(i+1)}}{\lambda_{eff\ (i+1)}} = \frac{\delta y_i + \delta y_{(i+1)}}{\lambda_{eff\ (i \rightarrow i+1)}},$$

$$\frac{\delta y_i}{\rho_{B\ i} D_{eff\ i}} + \frac{\delta y_{(i+1)}}{\rho_{B\ (i+1)} D_{eff\ (i+1)}} = \frac{\delta y_i + \delta y_{(i+1)}}{\rho_{B\ i} D_{eff} \Big|_{i \rightarrow (i+1)}}, \quad (5)$$

де підрядковий індекс свідчить, що значення параметра визначене за середніх у відповідному шарі значень температури та вологовмісту, оскільки λ_{eff} , D_{eff} , ρ є функціями вологості і температури продукту, які безперервно змінюються по товщині матеріалу.

Умови однозначності задачі.

Геометричні умови визначені під час формулюванні задачі.

Тому передусім для завдання сушіння як нестационарного треба сформулювати часові (в цьому випадку, початкові) умови

$$\tau = 0 \quad \text{і} \quad 0 \leq y = \delta, \quad T = T_0, \quad \rho_B = \rho_{B0}. \quad (6)$$

Фізичні умови однозначності, включають коефіцієнти перенесення (транспортні характеристики) для двох продуктів рослинного походження, а саме картоплі та моркви.

Граничні умови на поверхні поділу «пористе середовище – сушильний агент». Оскільки для моделювання застосовуємо дискретний позонний метод, граничні умови формуємо не для граничних поверхонь, як це роблять для неперервних моделей, а складаємо нестационарні умови для граничних шарів $i = 1$ та $i = n$.

Виходимо з припущення, що продукт розміщений на твердій поверхні лотка в неперервному контакті з ним. Тоді *граничними умовами для нижньої поверхні* є:

$$\tau > 0; \quad y = 0; \quad \partial \rho_B / \partial y = 0, \quad (7)$$

Енергетичний баланс нижнього шару можна описати таким виразом:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_{i=1} = \frac{1}{(\delta y \cdot \rho c)_{i=1}} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{i=1 \rightarrow 2} + \delta y \cdot q_{mw} \Big|_{i=1} + q_{конв} \right], \quad (8)$$

де $q_{конв}$ – тепловий потік від сушильного агента через металеву поверхню до нижнього шару продукту, Вт/м²; q_{mw} – потужність мікрохвильового поля в i -му шарі, Вт/м³.

Граничні умови для верхньої поверхні. Масовий баланс для n -го шару продукту біля поверхні сушіння в момент часу $\tau > 0$ і $y = \delta$ має вигляд:

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial \tau} \Big|_{i=n} = \frac{1}{\delta y_{i=n}} \left[-(\rho D_{eff})_{i=(n-1) \rightarrow n} \frac{\partial (\frac{\rho_B}{\rho})}{\partial y} \Big|_{i=(n-1) \text{ to } n} - G_{вип} \right] \quad (9)$$

де $G_{вип}$ – потік води, що випаровується з поверхні, кг/(м²·с); для різних сушильних агентів він визначається так:

– для повітря з рівняння масовіддачі

$$G_{\text{вип}} = \beta_m \left(\frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{R} \right) \left[\frac{a_w p_s(T_{i=n})}{T_{i=n}} - \frac{\varphi_{\text{п}} p_s(T_{\text{пов}})}{T_{\text{пов}}} \right] \quad (10)$$

де $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – молекулярна вага води, кг/кмоль; $\varphi_{\text{п}}$ – відносна вологість повітря; β_m – коефіцієнт масовіддачі пари в повітря, м/с; $\beta_m = \text{Sh} \cdot D_{\text{AB}} \cdot \rho_{\text{пов}} / L$; Sh – безрозмірнісне число Шервуда (дифузійне число Нуссельта Nu_D), визначається з безрозмірнісного рівняння масовіддачі

$$\text{Sh} = a_1 \text{Re}^{n_1} \text{Sc}^{m_1}, \quad (11)$$

Sc – безрозмірнісне число Шмідта; Re – безрозмірнісне число Рейнольдса, сушильного агента, $\text{Re} = v_{\text{пов}} \cdot L / \nu_{\text{пов}}$; $v_{\text{пов}}$ – швидкість сушильного агента, м/с; $\nu_{\text{пов}}$ – кінематична в'язкість сушильного агента, м²/с.

– для перегрітої пари

$$G_{\text{вип}} = \left(\rho D_{\text{eff}} \frac{\partial(\rho_{\text{в}} / \rho)}{\partial y} \right)_{i=n}. \quad (12)$$

При цьому дифузійна гранична умова першого роду задається у вигляді

$$p = \bar{p}_r = \alpha_w (W, \bar{T}) p_s(\bar{T}). \quad (13)$$

Енергетичний баланс для контрольного об'єму на поверхні сушіння в момент часу $\tau > 0$ і $h = H$ має вигляд:

Енергетичний баланс верхнього шару можна описати виразом

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_{i=n} = \frac{1}{(\delta y \cdot \rho c)_{i=n}} \left[q_{\text{конв}} + q_{\text{MW}} - q_{\text{вип}} - \lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{i=(n-1) \rightarrow n} \right], \quad (14)$$

де $q_{\text{конв}}$ – густина теплового потоку від сушильного агента до поверхні матеріалу, Вт/м², $q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{са}}(T_{\text{пов}} - T_{n=1})$; $\alpha_{\text{са}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від сушильного агента до поверхні матеріалу, Вт/(м²·К), $\alpha_{\text{са}} = \text{Nu} \cdot \lambda_{\text{пов}} / L$; $\lambda_{\text{са}}$ – теплопровідність сушильного агента, Вт/(м·К); Nu – безрозмірнісне число Нуссельта, визначається з безрозмірнісного рівняння тепловіддачі

$$\text{Nu} = a_2 \text{Re}^{n_2} \text{Pr}^{m_2}, \quad (15)$$

де Pr – безрозмірнісне число Прандтля; $q_{\text{вип}}$ – конвективний потік енергії з випареною вологою, Вт/м², $q_{\text{вип}} = G_{\text{вип}} h_{\text{п}}$; $h_{\text{п}}$ – ентальпія пари, Дж/кг; $h_{\text{п}} = r(T_{i=n}) + H_w$; H_w – теплота змочування, Дж/кг.

Числове розв'язання математичної моделі

Числове розв'язання задачі виконували з використанням методу Рунге–Кутти. Для спільного розв'язання рівнянь використовували пакети прикладних програм MATLAB та EXCEL. Під час розрахунку змінні характеристики процесу сушіння постійно оновлювалися під час кожного кроку обчислень.

Попередній числовий аналіз здійснювали для процесів конвективного сушіння картоплі та моркви повітрям. Це пов'язано з тим, що саме для цих продуктів визначені характеристики, які можна вважати достовірними в межах припущень задачі.

Аналіз результатів числового розв'язання моделі

Метою аналізу є визначення відносного впливу окремих факторів на інтенсивність процесу сушіння. Для порівняльного аналізу також розв'язували задачу для деяких так званих «модельних» матеріалів, що відрізняються від «базових» (картопля та морква) лише транспортними характеристиками.

На рис. 2. показано залежності зміни в часі середньозваженого вологовмісту висушуваних зразків моркви, картоплі, а також модельних середовищ (кінетичні криві).

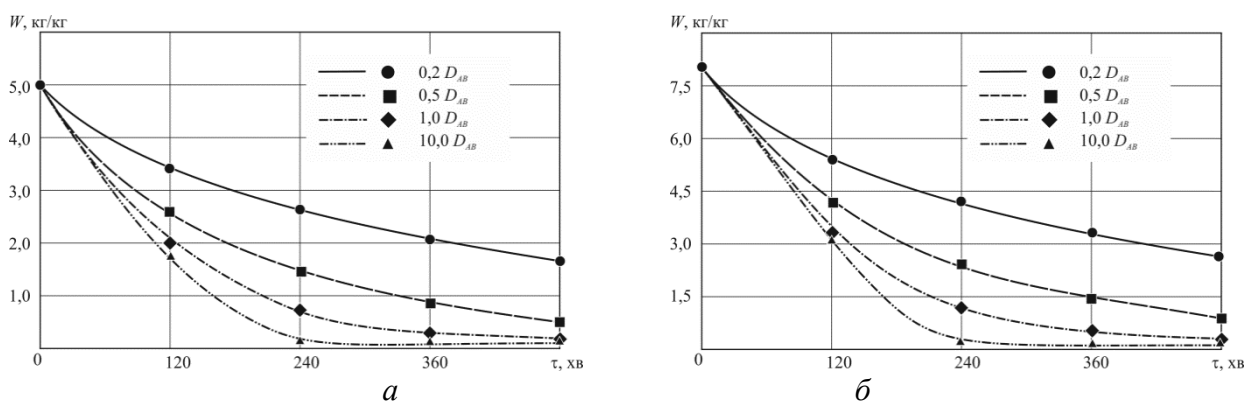


Рис.2. Зміна вологовмісту картоплі (а), моркви (б) та модельних матеріалів за різних дифузій вологи, але однакових інших властивостей під час сушіння

Очевидно, швидкість зміни вологовмісту прямо залежить від величини коефіцієнта дифузії. Водночас аналіз показаних на рис. 3 графіків зміни швидкості зневоднення в часі свідчить про відповідну залежність швидкості зміни вологовмісту від градієнтів вологовмісту.

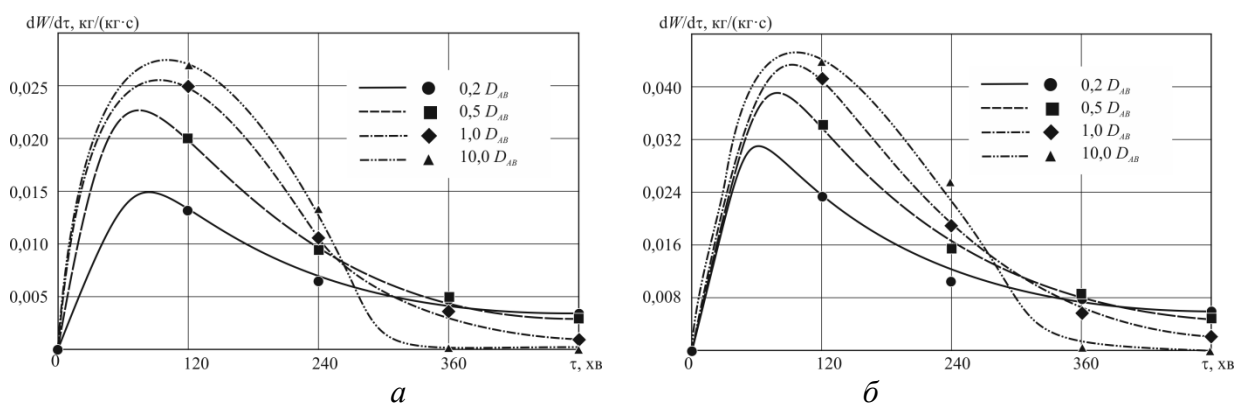


Рис. 3. Зміна швидкості зневоднення картоплі (а), моркви (б) та інших модельних матеріалів за різних дифузій вологи, але однакових інших властивостей

Водночас, аналіз свідчить, що на певному етапі, тривалість якого залежить від транспортних властивостей матеріалів, швидкості зміни вологовмісту стають відносно сталими.

На рис. 4 показано порівняння інтенсивності випаровування з поверхні матеріалу як функції середньозваженого вологовмісту для матеріалів з різними теплофізичними властивостями та транспортними характеристиками.

Спільним для різних матеріалів, незалежно від теплофізичних властивостей і значень транспортних характеристик, є те, що рівень швидкості випаровування, сягає близько $1,4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, далі залишається незмінною. Причому досягнення цього етапу постійності потоку випаровування настає тим швидше, чим вищі транспортні характеристики пористого середовища (коефіцієнти дифузії).

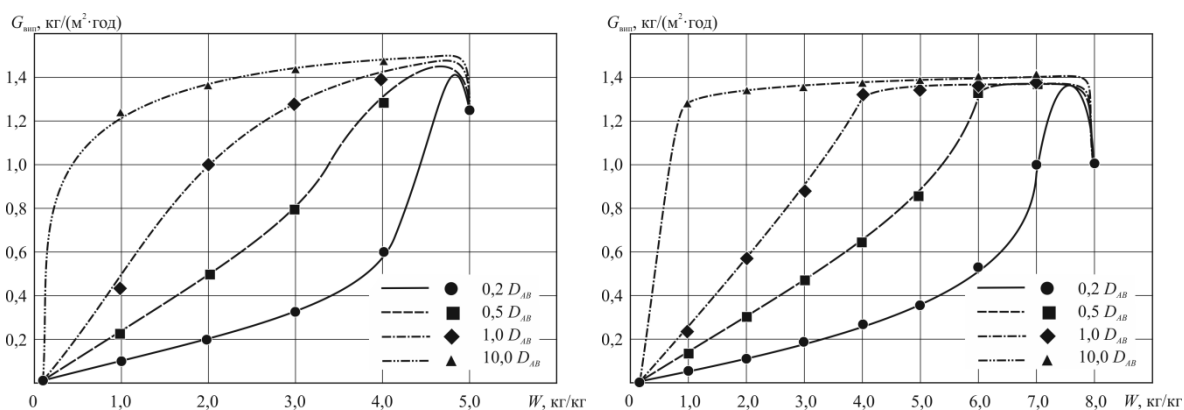


Рис.4. Залежність інтенсивності випаровування з поверхні картоплі (а), моркви (б) та інших модельних матеріалів за різних дифузій вологи, але однакових інших властивостей

Оскільки єдиним, що є однаковим для всіх аналізованих випадків сушіння, є характеристики сушильного агента (повітря), можна зробити висновок, що на цьому завершальному етапі процесу сушіння інтенсивність випаровування визначається переважно зовнішніми умовами масо- та теплоперенесення в сушильному агенті та залежить, в основному, від зовнішніх умов задачі.

Отже, можна зробити висновок, що розроблена модель дає змогу врахувати відносний вплив як зовнішніх, так і внутрішніх умов задачі та надалі врахувати додатковий вплив комбінованого методу підведення енергії.

Висновки

В рамках сформульованої моделі розроблено одновимірну інженерну модель комбінованого сушіння капілярно-пористих тіл конвективним і мікрохвильовим підведенням енергії. Модель дає можливість проаналізувати вплив різних характеристик і параметрів процесу сушіння, передусім транспортних характеристик, на інтенсивність сушіння. Модель також дає можливість визначити відносний вплив зовнішніх і внутрішніх механізмів перенесення на інтенсивність зневоднення.

Література

1. Шутюк В.В. Математичне моделювання сушіння харчових продуктів перегрітою парою / В.В. Шутюк, С.М. Василенко, О.С. Бессараб // Наукові праці НУХТ. – 2013. – № 49. – С. 120-126.
2. Barbosa-Canovas G.V. Dehydration of Foods / G.V. Barbosa-Canovas, H. Vega-Mercado // International Thomson Publishing: New York, 1996. – P. 121–205.
3. Chen G. Theoretical study of microwave heating patterns on batch fluidized bed drying of porous material / G. Chen, W. Wang, A.S. Mujumdar // Chemical Engineering Science. – 2001. – № 56. – P. 6823–6835.
4. Geankoplis C.J. Transport Processes and Unit Operations, 3rd Ed / C.J. Geankoplis // PTR Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1993. – P. 50-62.
5. Liapis A.I. Theory for the primary and secondary drying stages of the freeze-drying of pharmaceutical crystalline and amorphous solutes: Comparison between experimental data and theory / A.I. Liapis, R.A. Bruttini // Separation Technology. – 1994. – № 4. – P. 144–155.
6. Luikov A.V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies / A.V. Luikov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1975. – № 18. – P. 1–14.
7. Millman M.J. Analysis of the lyophilization process using a sorption-sublimation model and various operational policies / M.J. Millman, A.I. Liapis, J.M. Marchello // AIChE Journal. – 1985. – № 31. – P. 1594–1604.

8. Ni H. Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: A multiphase porous media model / H. Ni, A.K. Datta, K.E. Tottance // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1999. – № 42. – P. 1501–1512.
9. Rizvi S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In *Engineering Properties of Foods, 2nd Ed* / M.A. Rao, S.S.H. Rizvi // Eds. – Marcel Dekker: New York, 1995. – 76 p.
10. Sanga E.C.M. Microwave Assisted Drying of Composite Models: Modeling and Experimental Validation / E.C.M. Sanga // Ph.D. Thesis, McGill University, 2002. – P. 60-84.
11. Stanish M.A. Mathematical model of drying for hygroscopic porous media / M.A. Stanish, G.S. Schajer, F.A. Kayihan // *AIChE Journal*. – 1986. – № 32. – P. 1301–1311.
12. Wang Z.H. Heat and mass transfer in fixed-bed drying / Z.H. Wang, G. Chen // *Chemical Engineering Science*. – 1999. – № 54. – P. 4233–4243.
13. Wang Z.H. Heat and mass transfer in batch fluidized drying of porous particles / Z.H. Wang, G. Chen // *Chemical Engineering Science*. – 2000. – № 55. – P. 1857–1869.
14. Wang Z.H. Theoretical study of fluidized bed drying with microwave heating / Z.H. Wang, G. Chen // *Industrial Engineering and Chemistry Research*. – 2000. – № 59. – P. 775–782.
15. Whitaker S. Simultaneous heat, mass, momentum transfer in porous media: A theory of drying / S. Whitaker // *Advances in Heat Transfer*. – 1977. – № 13. – P. 119–203.