

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 536.2: 678.4.04

Аналітичне дослідження сушки щільного шару сипких матеріалів у мікрохвильовому полі

І. Л. Бошкова¹✉, Н. В. Волгушева², К. О. Канауз³, А. І. Фелонюк⁴, О. С. Бондаренко⁵¹⁻⁵Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.comORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0001-5989-9223>; ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;⁴<http://orcid.org/0000-0002-0219-4019>; ⁵<https://orcid.org/0000-0002-0111-0768>

Аналітично досліджується нагрівання щільного шару сипких (гранульованих) матеріалів у мікрохвильовому полі. Представлено математичну модель процесу сушіння у вигляді диференціальних рівнянь переносу стосовно необмеженої пластини. Модель враховує ослаблення впливу внутрішніх джерел у процесі сушіння за рахунок зміни діелектричних характеристик вологого матеріалу. Враховується, що втрата вологи у матеріалі підпорядковується експоненційному закону. Розглянуто фізичний сенс складових рівнянь перенесення теплоти та маси. Описано процедуру отримання розрахункових залежностей для визначення середньої температури та вмісту вологості шару за граничних умов третього роду (тепловідача на границі). Отримані залежності дають можливість розраховувати значення вмісту вологи і температури матеріалу при мікрохвильовому нагріванні. Проведена апробація математичної моделі сушіння щільного шару сипкого матеріалу при різних значеннях коефіцієнта тепловідачі і питомої потужності мікрохвильового поля. Наведено результати зіставлення розрахункових даних з результатами експериментів, які демонструють зміну температури та вмісту вологи в часі. Показано, що розрахункові та експериментальні дані задовільно сходяться. Зазначається, що експериментальні криві свідчать про наявність автоколивального процесу зміни температури при сушінні, що пояснюється дифузійним опором матеріалу виходу вологи. Сумісність експериментальних та розрахункових результатів свідчить про відповідність математичної моделі реальним процесам перенесення теплоти та вологи при нагріванні шару матеріалу в мікрохвильовому полі. Апробація аналітичних залежностей для середньої температури шару та вологовмісту дозволяє стверджувати, що їх можна рекомендувати для оцінки технологічних параметрів процесів перенесення теплоти та вологи при нагріванні шару матеріалу в мікрохвильовому полі.

Ключові слова: Мікрохвильове нагрівання; Математична модель; Коефіцієнт тепловідачі; Внутрішні джерела теплоти; Коефіцієнт ослаблення; Апробація; Температура; Вміст вологи

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v58i2.2379>

© The Author(s) 2022. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Вступ

Сипкі матеріали широкого класу поширені у багатопланових теплотехнічних процесах. До них відноситься сушіння зернових матеріалів, підготовка хімічних каталізаторів, сушіння цеолітів [1], нагрівання композитних матеріалів [2]. Метод нагрівання матеріалів у мікрохвильовому електро-

магнітному полі зарекомендував себе як високо-ефективний щодо швидкості, енерговитрат та якості кінцевої продукції у процесах термообробки та сушіння, про що свідчать результати аналізу експериментальних даних. Подальше вивчення процесу мікрохвильового нагріву доцільно доповнити аналітичними дослідженнями, серед яких найбільш важливі дані щодо температури мате-

ріалу, що є базовими для оцінки ефективності дії мікрохвильового поля та впливу вхідних характеристик на технологічний процес. При побудові математичної моделі реального об'єкта приймається ряд припущень, що спрощують, з метою виключення громіздких виразів, які важко використовувати в подальшому. Аналітичне дослідження мікрохвильового нагрівання дає можливість ще на стадії проектування технологічного об'єкта отримати узагальнені характеристики, виражені через конструктивні та технологічні параметри.

2. Сучасний стан дослідження процесу мікрохвильового нагрівання діелектричних матеріалів

Літературні дані свідчать, що застосування мікрохвильового нагріву в багатьох випадках призводить до покращення технологічного процесу та якості одержуваного матеріалу. При дослідженні кінетики сушіння кварцового піску та його сумішей мікрохвильовим випромінюванням [3] визначено, що для стабілізації якості при виготовленні ливарних форм і стрижнів рекомендується до початку структурування пакований рідким натрієвим склом кварцовий пісок попередньо просушити в полі мікрохвильового випромінювання протягом не менше 3 хвилин. Використання електротермічних технологій при використанні мікрохвильової енергії є важливим кроком у розробці нових інноваційних рішень [4]. Проводяться дослідження якості одержуваного продукту, створені задля встановлення меж застосування мікрохвильових технологій [5].

Одним з найважливіших процесів у промисловості, а також одним з найчастіше досліджуваних тем у харчовій інженерії, є сушіння [6]. Оптимізація цього процесу призведе до зниження собівартості та підвищення якості продукції. Вологоперенесення в неоднорідних матеріалів є складним процесом, у якому може мати місце кілька механізмів переносу. Процес сушіння є одним із основних способів консервування харчових продуктів [7]. На сьогодні велика увага приділяється вивченню комбінованих способів сушіння, так як їх застосування призводить до збільшення рушійної сили, скорочення часу та енергоємності процесу, а також дозволяє отримати якісний продукт. Особлива увага приділяється сушінню зернових матеріалів за використання мікрохвильового поля [8]. Згідно [9], якщо стоїть завдання

висушити зерно пшениці і знизити вологість з 20% до 14%, енергоспоживання конвективного сушіння більше 5000 кДж на 1 кг вологи, що випаровується, а для конвективно-мікрохвильового сушіння становить до 3500 кДж/кг, що свідчить про доцільність застосування мікрохвильової енергії при сушінні. Мікрохвильове сушіння (або в інших термінах – сушіння в полі надвисокої частоти НВЧ) може використовуватися як альтернативний метод для більш швидкого сушіння сільськогосподарських культур з ефективним використанням часу та енергії. У [10] наведено результати впливу МХ сушіння на посівні якості насіння. На прикладі насіння кукурудзи та пшениці [11] визначено, що кращі швидші методи сушіння, щоб запобігти псуванню зібраного насіння. Метою дослідження [11] була розробка математичної моделі для імітації умов сушіння насіння пшениці під час сушіння у МХ печі. Розроблено суміщену математичну модель одночасного МХ та конвективного сушіння насіння пшениці у побутовій МХ печі, внаслідок чого отримано систему нелінійних рівнянь.

Складання математичних моделей, які адекватно відбивають фізичну сутність явищ, що протікають під впливом мікрохвильового поля, пов'язані з певними труднощами, що викликані багатofакторністю взаємодії електромагнітного поля з полярними діелектриками і необхідністю під час переходу до теплової схеми виключення вторинних елементів. Аналіз підходів до складання моделей взаємодії мікрохвильового поля з матеріалом показав, що коректні математичні моделі теплопровідності для аналізованої області досліджень можна отримати, ґрунтуючись на моделях А.В. Ликова, наведених у [12], в основі яких лежить рівняння теплопровідності з урахуванням внутрішніх джерел теплоти, які можуть бути як позитивними, так і негативними. Об'ємний характер нагрівання матеріалу в мікрохвильовому полі дозволяє розглядати матеріал як середовище, у якому діють внутрішні позитивні джерела теплоти. Аналіз представлених у наукових фахових виданнях результатів [13] дозволяє зробити висновок, що доцільно проводити подальший розвиток математичних моделей, що описують нагрівання сипких матеріалів в мікрохвильовій підлозі, стосовно окремих завдань, в даному випадку – до визначення середнього поточного вологовмісту і температури щільного шару сипкого матеріалу. Метою роботи є розробка математичної моделі та

отримання розрахункових залежностей для визначення середньої температури та вологовмісту при різній величині мікрохвильової потужності, що підводиться, та для різних умов взаємодії матеріалу з навколишнім середовищем.

3. Моделювання процесу сушіння щільного шару за наявності внутрішніх джерел теплоти

Розглядається процес сушіння щільного шару сипкого матеріалу, який можна уявити у вигляді необмеженої пластини. Система диференціальних рівнянь переносу стосовно необмеженої пластини (одномірне завдання) без градієнта загального тиску має вигляд:

$$\rho c \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \alpha(\bar{t} - t_p) \frac{F}{V} + J_1 - J_2; \quad (1)$$

$$\rho \frac{du}{d\tau} = \frac{J_1}{r} - \frac{c}{r} \frac{d\bar{t}}{d\tau} - \frac{F}{V_r} \alpha(\bar{t} - t_p), \quad (2)$$

де ρ – густина матеріалу; c – теплоємність; α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні до навколишнього середовища; V – об'єм матеріалу; t_0 – температура навколишнього середовища; F – площа поверхні оброблюваного шару; r – питома теплота пароутворення; J_1 – внутрішнє джерело теплоти, обумовлене дією МХ поля; J_2 – внутрішнє джерело теплоти, зумовлене випаром води.

Тут $\alpha(\bar{t} - t_p)F/V$ враховує теплоту, що відводиться від поверхні шару матеріалу шляхом природної конвекції, J_1/r – потік вологи, що випарувалася за рахунок дії внутрішніх джерел теплоти. Наведені вихідні рівняння отримані з огляду на те, що процес вирівнювання температури в тілі відбувається значно інтенсивніше, ніж відведення теплоти з поверхні, тобто задача є зовнішньою. Тому диференціальні рівняння були спрощені завдяки умові $dt/d\delta = 0$.

Розглянемо фізичний сенс складових цих рівнянь. У першому рівнянні враховувалося, що зміна температурного напору пов'язана з дією внутрішніх джерел теплоти, що призводять до зростання температури матеріалу, тепловіддачею з поверхні, що викликає падіння температури, та випаровуванням води, що враховується потоком J_2 . Рівняння (2) є балансовим для зміни вмісту вологи матеріалу при сушінні. Для більшої наочності воно може бути представлене у такому вигляді:

$$\rho \frac{du}{d\tau} = - \frac{\left[J_1 - \rho c \frac{d\bar{t}}{d\tau} - \frac{F}{V} \alpha(\bar{t} - t_{н.с.}) \right]}{r}. \quad (3)$$

У рівнянні (3) у чисельнику представлений тепловий потік $J_{вип}$, який витрачається на випаровування води, у вигляді різниці теплового потоку J_1 , який генерується в матеріалі під дією мікрохвильового поля, та теплових потоків, які йдуть на нагрівання матеріалу $\rho c(d\bar{t}/d\tau)$ та охолодження при конвекції $(F/V)\alpha(\bar{t} - t_{н.с.})$. Значення $J_{вип}/r$ відповідає кількості води, що випаровується із тіла за одиницю часу. Знак мінус перед рівнянням означає, що враховується зміна вмісту вологи в матеріалі, яке падає в процесі сушіння.

У середині тіла діє джерело теплоти (мікрохвильове поле), яке залежить від часу в експоненційній формі:

$$J_1 = J_{10} e^{-\gamma_1 \tau}; \quad (4)$$

$$J_{10} = P_{вих} \cdot \eta_k / V, \quad (5)$$

де J_{10} – максимальна питома потужність джерела, обумовлена дією генератора мікрохвильової енергії, $Вт/м^3$, γ_1 – коефіцієнт ослаблення електромагнітної енергії у матеріалі, $с^{-1}$. Експонентний закон зміни внутрішнього джерела J_2 прийнятий на підставі експериментальних досліджень, представлених у [14].

$$J_2 = J_{20} e^{-\gamma_2 \tau}; \quad (6)$$

$$J_{20} = \rho \cdot N \cdot r, \quad (7)$$

де J_{20} – максимальна питома потужність джерела, зумовлена теплотою випаровування, $Вт/м^3$; γ_2 – коефіцієнт ослаблення швидкості сушіння, $с^{-1}$. Аналіз експериментальних даних привів до висновку, що інтенсивність втрати вологи змінюється за експонентним законом, так що швидкість сушіння в будь-який момент часу можна уявити залежністю $N = N_0 \cdot e^{-\gamma_2 \tau}$ (де N_0 – швидкість сушіння після закінчення періоду нагрівання).

З урахуванням наведених даних, диференціальний вигляд рівнянь (1)-(2) перетворюється на (8)-(9):

$$\rho c \frac{d\bar{t}}{d\tau} = -\alpha(\bar{t} - t_{н.с.}) \frac{F}{V} + J_{10} e^{-\gamma_1 \tau} - J_{20} e^{-\gamma_2 \tau}; \quad (8)$$

$$\rho \frac{du}{d\tau} = -\frac{J_{10}}{r} e^{-\gamma_1 \tau} + \frac{\rho c}{r} \frac{d\bar{t}}{d\tau} + \frac{F}{Vr} \alpha(\bar{t} - t_{н.с.}). \quad (9)$$

Рішення (9) за прийнятих початкових та гра-

ничних умов:

$$t = \frac{J_{10}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_1 \rho c} e^{-\gamma_1 \tau} - \frac{J_{20}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_2 \rho c} e^{-\gamma_2 \tau} + t_{н.с} + A e^{-\frac{\alpha F}{\rho c V} \tau}. \quad (10)$$

Таким чином, рівняння для середньої температури шару $\bar{t} = \bar{t}(\tau)$ визначено.

Інтегруючи вираз (2):

$$u = \frac{J_{20}}{pr} \frac{\gamma_2 \rho c V - \alpha F}{\alpha F - \gamma_2 \rho c V} e^{-\gamma_2 \tau} + B, \quad (11)$$

де B – постійна інтегрування.

Значення постійної A визначається заданою початковою умовою $\bar{t}|_{\tau=0} = t_{н.с}$

$$\bar{t}|_{\tau=0} = \frac{J_{10}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_1 \rho c} - \frac{J_{20}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_2 \rho c} + t_{н.с} + A = t_{н.с}.$$

Отже,

$$A = \frac{J_{20}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_2 \rho c} - \frac{J_{10}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_1 \rho c}. \quad (12)$$

Значення B визначається умовою $u|_{\tau=0} = u_0$.

Тоді

$$u|_{\tau=0} = -\frac{J_{20}}{pr} \frac{\gamma_2 \rho c V - \alpha F}{\alpha F - \gamma_2 \rho c V} + B = u_0,$$

і постійна інтегрування:

$$B = u_0 - \frac{J_{20}}{pr} \frac{\gamma_2 \rho c V - \alpha F}{\alpha F - \gamma_2 \rho c V}. \quad (13)$$

Розрахунок вологовмісту та температури за отриманими рівняннями передбачає знання коефіцієнтів α , γ_1 та γ_2 , а також теплофізичні властивості матеріалу.

4. Апробація математичної моделі сушіння щільного шару сипкого матеріалу

Розрахунок вмісту вологи і температури на прикладі шару зерна пшениці проводився при декількох значеннях α , отриманих для діапазону різниці температур $\Delta t = 0 \dots 60$ °С. Верхнє значення температур обмежувалося прийнятною допустимою температурою [15]. Коефіцієнти γ_1 і γ_2 визначалися емпірично, в результаті обробки експериментальних даних щодо сушіння різних видів сипких

матеріалів. Виявлено, що γ_1 слабо залежить від часу сушіння, у той час як γ_2 змінюється суттєво. Це викликано наступними причинами. Коефіцієнт γ_1 враховує ослаблення дії внутрішніх джерел у процесі сушіння, що відбувається за рахунок зміни діелектричних характеристик вологого матеріалу внаслідок зменшення вмісту вологи. Однак діапазон зміни вмісту вологи невеликий для значної зміни діелектричних властивостей. На початковому етапі сушіння випаровування практично немає. Вся енергія, що підводиться, йде на нагрівання матеріалу. Потім волога починає інтенсивно виходити з матеріалу та випаровуватися з його поверхні. Як показують експерименти, на певній ділянці (приблизно до вмісту вологи $u = 0,11$) швидкість сушіння монотонно зменшується. Ці особливості враховуються коефіцієнтом γ_2 .

Для знаходження γ_1 потрібно максимально виключити вплив випаровування вологи для зменшення похибки, так як потік вологи змінюється за складним законом і його внесок вносить велику похибку визначення корисного теплового потоку. Тому використовувалися дані по початковому періоду сушіння (періоду прогріву матеріалу) та дані додаткового експерименту, проведеного з тією ж масою зразка і при тій же вихідній потужності магнетрона, але при іншому, нижчому, вмісту вологи. У ході експериментів визначалася температура матеріалу на початку мікрохвильового нагріву та наприкінці періоду, температура навколишнього середовища, розраховувалася площа відкритої поверхні матеріалу та його об'єм. Експеримент проводився з трикратним повторенням, за результатами їх розраховувалося середнє значення температур.

Значення коефіцієнтів γ_1 і γ_2 отримані за результатами аналізу кривих кінетики сушіння та наведені в таблиці. Як видно з таблиці, зі зростанням вихідної потужності магнетрона коефіцієнт ослаблення γ_2 зменшується, що пов'язано з інтенсифікацією процесу сушіння: нахил кривої сушіння при МХ нагріванні при переході від значення вихідної потужності магнетрона $P_{вих} = 100$ Вт (№1) до $P_{вих} = 240$ Вт (№ 3) менше змінюється в часі. Коефіцієнт ослаблення γ_2 зменшився в 1,48 разу при збільшенні потужності в 2,4 рази, отже, на його величину впливає не тільки зміна вмісту вологи матеріалу, але і внесок іншої фізичної величини, імовірно, зменшення дифузійного опору матеріалу при збільшенні швидкості виходу вологи до поверхні.

Таблиця – Емпіричні дані по коефіцієнтам γ_1 та γ_2 в залежності від вихідної потужності магнетрону

№	$P_{\text{вих}}, \text{Вт}$	$J_{10} \cdot 10^{-5}, \text{Вт/м}^3$	$J_{20} \cdot 10^{-5}, \text{Вт/м}^3$	$\gamma_1, \text{с}^{-1}$	$\gamma_2, \text{с}^{-1}$
1	100	3,37	2,91	$6,98 \cdot 10^{-5}$	$6,829 \cdot 10^{-4}$
2	180	5,62	3,83	$7,33 \cdot 10^{-5}$	$5,213 \cdot 10^{-4}$
3	240	8,44	4,20	$8,12 \cdot 10^{-5}$	$4,621 \cdot 10^{-4}$

Примітка: маса шару 420 г.

Коефіцієнт γ_1 зменшився в 1,16 разів: це дозволяє припустити, що така зміна пов'язана виключно з похибкою експерименту і не залежить від теплового потоку, а сам коефіцієнт визначається лише зміною діелектричних властивостей матеріалу.

Аналіз результатів підтверджує припущення, що коефіцієнт γ_1 для всіх видів матеріалів не залежить від потужності, що підводиться. Зі збільшенням маси матеріалу значення J_{10} і J_{20} зменшуються, так як зменшується питоме теплове навантаження $q_V, \text{Вт/м}^3$. Відповідно дещо збільшується коефіцієнт γ_2 . Так, при масі 420 г та при вихідній потужності магнетрона $P_{\text{вих}} = 240 \text{ Вт}$ коефіцієнт $\gamma_2 = 5,67 \cdot 10^{-4}$ для насіння пшениці. При цьому значення q_V зменшилося у 3,2 рази.

Результати розрахунку представлені на рис. 1 (зміна температури матеріалу в часі) та рис. 2 (зміна вмісту води в часі).

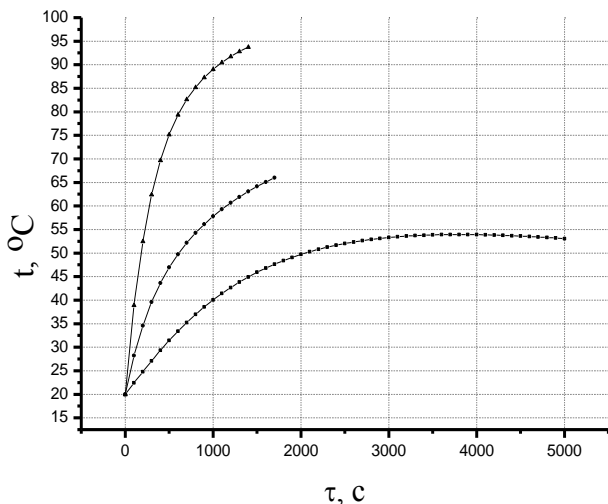


Рис. 1 – Зміна температури матеріалу в часі при різних значеннях потужності, що підводиться

Зіставлення отриманих даних із результатами експериментів показують їхню задовільну збіжність. Були проведені варіантні розрахунки за різних значеннях теплофізичних характеристик.

Метою цих розрахунків була перевірка працездатності моделі за зміни визначальних величин, таких як густина матеріалу, теплоємність, коефі-

цієнт тепловіддачі. Розрахунки показали, що математична модель правильно відображає вплив цих величин на зміну температури та вмісту води.

На рис. 3 представлені залежності температури матеріалу від часу за різних значень коефіцієнта тепловіддачі α .

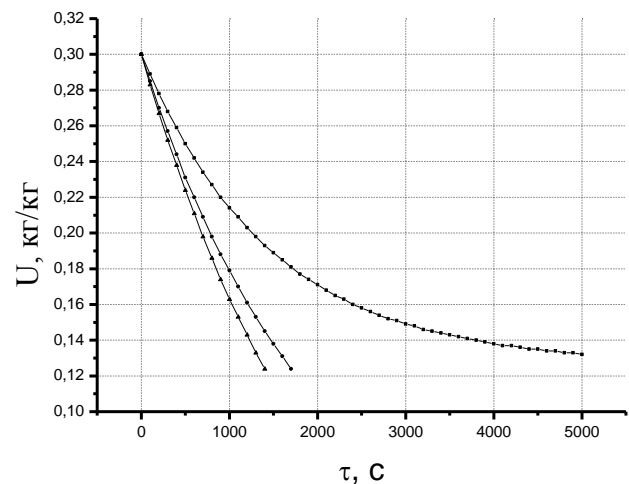


Рис. 2 – Зміна вмісту води в часі при різних значеннях потужності, що підводиться

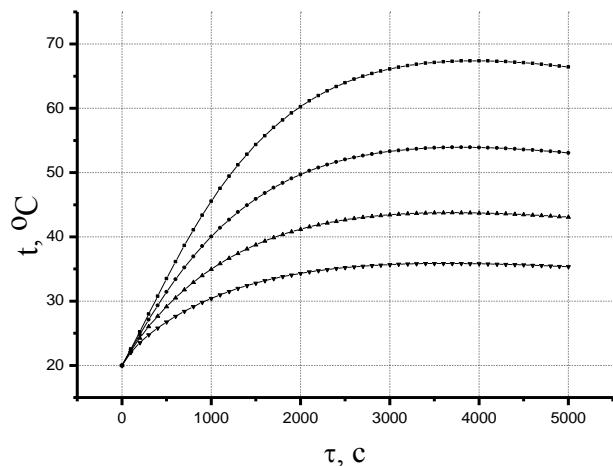


Рис. 3 – Зміна середньої температури матеріалу у часі за різних значень коефіцієнта тепловіддачі: 1 – $\alpha = 5 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$; 2 – $\alpha = 7 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$; 3 – $\alpha = 10 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$; 4 – $\alpha = 15 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$.

Видно, що зі збільшенням α температура матеріалу падає, що свідчить про відповідність реальним явищам. Результати перевірки отриманих залежностей експериментальних даних показують хорошу збіжність.

5. Зіставлення розрахункових та експериментальних даних щодо сушіння щільного шару зерна в мікрохвильовому полі

На рис. 4 представлені дані розрахунку та експерименту при для аналогічних вихідних даних. Видно, що експериментальні точки прак-

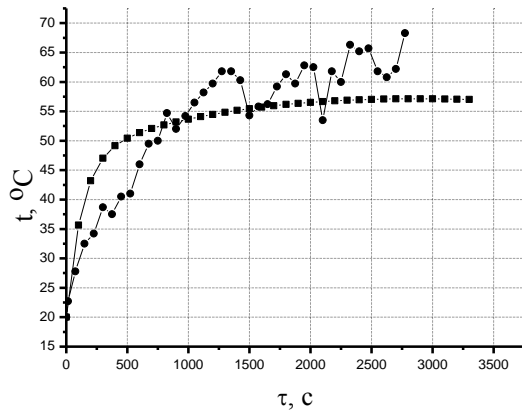


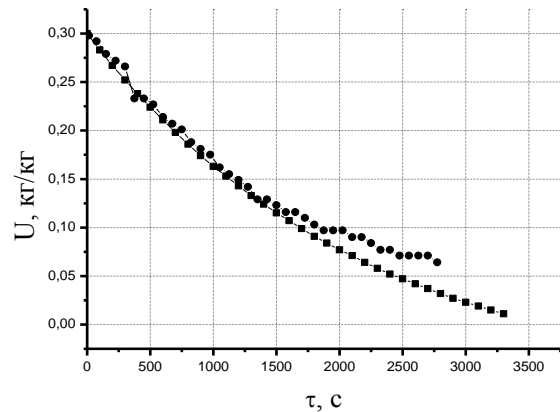
Рисунок 4 – Кінетика сушіння в мікрохвильовому полі: порівняння експериментальних ● та розрахункових даних ■ для насіння пшениці. Маса $m = 400$ г, вихідна потужність магнетрона $P_{вих} = 450$ Вт, коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 5$ Вт/(м²К)

Аналіз температурних кривих свідчить, що після періоду нагрівання матеріалу та включення механізму випаровування води в тілі при теплових навантаженнях $q_V > 2,2 \cdot 10^3$ Вт/кг спостерігаються автоколивальні процеси, що виражаються у пульсаційній зміні температури. Імовірно це пов'язано зі зростанням тиску в матеріалі при перевищенні температури вище 50 °С, а потім, після досягнення певного значення, властивості міцності матеріалу вже не дозволяють утримувати пару і вона виривається назовні – тиск спадає, температура зменшується. При подальшому підведенні потужності процес повторюється. На кривій вмісту води коливальний характер процесу виражений менш слабо, що пояснюється різними тепловими ефектами. Так, у періоді випаровування кількість теплоти, яка витрачається на випаровування, витрачається здебільшого на випаровування, і меншою – на зміну температури, у періоді нагрівання картина зворотна. Однак, оскільки відхилення в кількості теплоти, що витрачається на випаровування, виявляється у незначних коливаннях маси (внаслідок великого значення питомої теплоти пароутворення), то зміни температур будуть суттєво вищими.

6. Висновки

Отримано аналітичне рішення диференціаль-

точно описуються розрахунковою кривою для вмісту води. Великий розкид значень на кривих після досягнення вмісту води 0,15 % пояснюється тим, що в моделі не враховується зміна коефіцієнта γ_1 . Проте сушіння в промислових умовах триває до вмісту води 14,5 %, що дозволяє прийняти значення цієї величини постійної.



них рівнянь, що описують зміну температури та вмісту води при сушінні в мікрохвильовому полі з урахуванням конвективного теплообміну з навколишнім середовищем.

При використанні отриманих залежностей доцільно скористатися значеннями максимальної питомої потужності джерела J_{20} , обумовленого процесом випаровування води, а також значеннями коефіцієнтів γ_1 і γ_2 , отриманими експериментально, за умов, відповідних розрахунковим.

Зіставлення розрахункових даних за отриманими залежностями та експериментальних даних показують хорошу збіжність, що дозволяє рекомендувати представлені аналітичні залежності для оцінки технологічних параметрів процесів перенесення теплоти та води при нагріванні шару матеріалу в мікрохвильовому полі

Особистий внесок авторів CRediT

Бошкова І. Л.: концептуалізація, методологія, формальний аналіз. **Волгушева Н. В.:** складання математичної моделі, формальний аналіз результатів. **Капауз К. О.:** проведення розрахунків, обробка результатів. **Фелонюк А. І.:** інформаційний пошук літературних даних, аналіз результатів. **Бондаренко О. С.:** рішення моделі у диференційному вигляді, верифікація математичних моделей мікрохвильового сушіння.

Література

1. **Huang H., Ito S., Watanabe F., Hasatani M., Kobayashi N.** Microwave Irradiation Effect in Water-vapor Desorption from Zeolites // Part of the book: Microwave Heating. – 2011. – P. 335-350.
2. **D. A. Kalganov, I. V. Bychkov, A. P. Anzulevich, A. A. Fediy, Dzh. Peng, Yu. A. Lupitskaya** Microwave heating of composite materials based on iron oxides // Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya. – 2019. – Vol. 83, Is. 12. – P. 1718-1721.
3. **L. I. Solonenko, S. I. Repiakh, K. I. Uzlov, I. Mamuzich, T.V. Kimstach, O.P. Bilyi.** Kinetics of quartz sand and its mixtures drying by microwave radiation // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – Vol. 1. – P. 68-77.
4. **Francisc-Ioan Hathazi.** The Use of Microwave Drying Process to the Granular Materials // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2019. – Vol. 10, Is. 11. – P. 23-28.
5. **J. Kaasová, B. Hubáčková, P. Kadlec, J. Příhoda, Z. Bubník.** Chemical and Biochemical Changes during Microwave Treatment of Wheat // Czech Journal of Food Sciences. – 2002. – Vol. 20, Is. 2. – P. 74-78.
6. **J. Srikiatden, J. S. Roberts.** Moisture transfer in solid food materials: A Review of mechanisms, models, and measurements // International Journal of Food Properties. – 2007. – Vol. 10. – P. 739-777.
7. **O. Burdo, I. Bezbakh, S. Shyshov, A. Zykov, I. Yaroviy, A. Gavrilov.** Research of wheat drying in a microwave and combined filter-microwave dryer // Food Science and Technology. «EUREKA: Life Sciences». – 2019. – Vol. 5. – P. 70-79.
8. **A. A. Vasilyev, A. N. Vasilyev, D. Budnikov, V. Bolshov, M. Jasinski, Z. Leonowicz, R. Gono, L. Jansins.** Effect of Dynamic Bridging on Homogeneous Grain Movement in a Microwave Processing Zone // Agronomy. – 2021. – Vol. 11. – P. 2-16.
9. **N.I. Malin, Y.A. Kanatnikov.** Energy and resource saving when drying grain // In Actual Problems of the Agro-Industrial Complex Energy; Saratov State Agrarian University. – 2016. – P. 124-131.
10. **Vicaş (Coman) Simina.** Experimental data on microwave dried corn seeds // Analele Universităţii din Oradea, Fascicula Protecţia Mediului. – 2012. – Vol. XIX. – P. 217-222.
11. **M. Hemis, R. Choudhary, G. Dennis, A. Watson.** Coupled mathematical model for simultaneous microwave and convective drying of wheat seeds // Biosystems Engineering. – 2012. – Vol. 112, Is. 3. – P. 202-209.
12. **Ликов А. В.** Теорія теплопровідності. – М.: Вид-во «Вища школа», 1967. – 559 с.
13. **I. Alibas.** Mathematical modeling of microwave dried celery leaves and determination of the effective moisture diffusivities and activation energy // Food Science and Technology. – 2014. – Vol. 34(2). – P. 394-401.
14. **I. Boshkova, N. Volgusheva, A. Titlov, S. Titar, L. Boshkov.** Assessment of efficiency of drying grain materials using microwave heating // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 1/8 (97). – P. 78-85.
15. **W. L. Roland, K. M. Seetharamu.** Heat and mass transfer in food processing // IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry. – 1995. – Vol. 5. – P.303-324.

Отримана в редакції 03.04.2022, прийнята до друку 16.05.2022

Analytical investigation of drying of dense layer of granular materials in a microwave field

Iryna Boshkova¹✉, Natalya Volgusheva², Kateryna Kapauz³, Anastasiia Feloniuk⁴, Oksana Bondarenko⁵
¹⁻⁵Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0001-5989-9223>; ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;

⁴<http://orcid.org/0000-0002-0219-4019>; ⁵<https://orcid.org/0000-0002-0111-0768>

The heating of a dense layer of loose (granular) materials in a microwave field is studied analytically. A mathematical model of the drying process is presented in the form of differential transfer equations as applied to an unlimited plate. The model takes into account the weakening of the effect of internal sources during the drying process due to changes in the dielectric characteristics of the wet material. It is taken into account that the loss of moisture in the material obeys an exponential law. The physical meaning of the components of the heat and mass transfer equations is considered. A procedure is described for obtaining calculated dependences for determining the average temperature and moisture content of a layer

under boundary conditions of the third kind (heat transfer at the boundary). The obtained dependences make it possible to calculate the values of moisture content and temperature of the material during microwave heating. A mathematical model for drying a dense layer of a dispersed material was tested for various values of the heat transfer coefficient and the specific power of the microwave field. The results of comparing the calculated data with the results of experiments, which demonstrate the change in temperature and moisture content over time, are presented. It is shown that the calculated and experimental data agree satisfactorily. It is noted that the experimental curves indicate the presence of a self-oscillatory process of temperature change during drying, which is explained by the diffusion resistance of the material to the release of moisture. The compatibility of experimental and calculated results indicates the conformity of the mathematical model to the real processes of heat and moisture transfer when heating a layer of material in a microwave field. Approximation of analytical dependences for the average temperature of the layer and moisture content suggests that they can be recommended for estimating the technological parameters of heat and moisture transfer processes when heating the material layer in a microwave field.

Keywords: Microwave heating; Mathematical model; Heat transfer coefficient; Internal heat sources; Attenuation coefficient; Approximation; Temperature; Moisture content

References

- Huang, H., Ito, S., Watanabe, F., Hasatani, M., Kobayashi, N. (2011) Microwave Irradiation Effect in Water-vapor Desorption from Zeolites. *Part of the book: Microwave Heating*, 335-350.
- Kalganov, D. A., Bychkov, I. V., Anzulevich, A. P., Fediy, A. A., Peng, Dzh., Lupitskaya, Yu. A. (2019) Microwave heating of composite materials based on iron oxides. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 83, 12, 1718-1721.
- Solonenko, L. I., Repiakh, S. I., Uzlov, K. I., Mamuzich, I., Kimstach, T. V., Bilyi, O.P. (2021) Kinetics of quartz sand and its mixtures drying by microwave radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 68-77.
- Francisc-Ioan Hathazi (2019) The Use of Microwave Drying Process to the Granular Materials. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10, 11, C. 23-28.
- Kaasová, J., Hubáčková, B., Kadlec, P., Příhoda, J., Bubník, Z. (2002) Chemical and Biochemical Changes during Microwave Treatment of Wheat. *Czech Journal of Food Sciences*, 20, 2, 74-78.
- Srikiatden, J., Roberts, J. S. (2007) Moisture transfer in solid food materials: A Review of mechanisms, models, and measurements. *International Journal of Food Properties*, 10, 739-777.
- Burdo, O., Bezbakh, I., Shyshov, S., Zykov, A., Yarovyi, I., Gavrilov, A. (2019) Research of wheat drying in a microwave and combined filter-microwave dryer. *Food Science and Technology. «EUREKA: Life Sciences»*, 5, 70-79.
- Vasilyev, A. A., Vasilyev, A. N., Budnikov, D., Bolshev, V., Jasinski, M., Leonowicz, Z., Gono, R., Jasins, L. (2021) Effect of Dynamic Bridging on Homogeneous Grain Movement in a Microwave Processing Zone. *Agronomy*, 11, 2014, 2-16.
- Malin, N.I.; Kanatnikov, Y.A. (2016) Energy and resource saving when drying grain. *In Actual Problems of the Agro-Industrial Complex Energy; Saratov State Agrarian University*, 124-131.
- Vicaş (Coman) Simina (2012) Experimental data on microwave dried corn seeds. *Annals of the University of Oradea, Environmental Protection Fascicula*, XIX, 217-222.
- Hemis, M., Choudhary, R., Dennis, G. Watson, A. (2012) Coupled mathematical model for simultaneous microwave and convective drying of wheat seeds. *Biosystems Engineering*, 112, 3, 202-209.
- Lykov, A. V. (1967) Theory of heat conduction. *M.: Higher School Publishing House*, 559.
- Alibas, I. (2014) Mathematical modeling of microwave dried celery leaves and determination of the effective moisture diffusivities and activation energy. *Food Science and Technology*, 34(2), 394-401.
- Boshkova, L., Volgusheva, N., Titlov, A., Titar, S., Boshkov, L. (2019) Assessment of efficiency of drying grain materials using microwave heating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/8 (97), 78-85.
- Roland, W.L., Seetharamu, K.M. (1995) Heat and mass transfer in food processing. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry*, 5, 303-324.

Received 03 April 2022

Approved 16 May 2022

Available in Internet 30 June 2022