

MODEL OF HEAT EXCHANGE KINETICS DURING THE MICROWAVE PROCESSING OF FOOD RAW MATERIALS

I. Babanov

National University of Food Technologies

V. Potapov, S. Prasol, A. Shevchenko

Kharkiv State University of Food Technology and Trade

Key words:

*Heat transfer
Model
Equation
Microwave
Moisture
Pressure
Temperature*

ABSTRACT

The processes of microwave processing of food raw materials are quite complex for theoretical modeling, since, in terms of the thermodynamics of irreversible processes, this is a series of associated phenomena of mass transfer, energy, momentum under heterogeneity and nonlinearity of a heterogeneous medium. The lack of systematic approaches in obtaining the models often leads to gross errors and, as a consequence, to inaccurate experimental data. Usually it is assumed that the main mass transfer is carried out not by the concentration of moisture diffusion, but by the influence of thermal diffusion, and the filtration transfer can be neglected. The authors propose a kinetic model of heat and mass transfer processes under the influence of microwave fields on food raw materials, which takes into account the filtration mass transfer under the action of the pressure gradient that occurs in the volume of the body. The equations describing the kinetics of moisture content, pressure and temperature on the product are obtained. The model of heat and mass transfer kinetics in the process of microwave processing allows calculating the change of moisture content, pressure and temperature of the product. This enables to conduct an effective analysis of technological processes using electromagnetic fields in order to find rational technological regimes and improve the equipment calculation.

Article history:

Received 17.09.2017

Received in revised form
04.10.2017

Accepted 20.10.2017

Corresponding author:

I. Babanov

E-mail:

npnuht@ukr.net

DOI: 10.24263/2225-2924-2017-23-5-1-12

МОДЕЛЬ КІНЕТИКИ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В ПРОЦЕСІ НВЧ-ОБРОБКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

І.Г. Бабанов

Національний університет харчових технологій

В.О. Потапов, С.В. Прасол, А.О. Шевченко

Харківський державний університет харчування та торгівлі

Процеси мікрохвильової (НВЧ) обробки харчової сировини достатньо складні для теоретичного моделювання, оскільки, з точки зору термодинаміки необоротних процесів, це ряд пов'язаних явищ переносу маси, енергії, імпульсу в

умовах неоднорідності та нелінійності гетерогенного середовища. Відсутність системного підходу при отриманні моделей часто призводить до грубих помилок і, як наслідок, поганої адекватності з експериментом. Зазвичай, роблять припущення, що основний масоперенос здійснюється не концентраційною дифузією вологи, а впливом термодифузії, і фільтраційним перенесенням можна знехтувати. У статті запропоновано кінетичну модель тепломасообмінних процесів при впливі НВЧ-поля на харчову сировину, яка враховує фільтраційний масоперенос під дією градієнта тиску, що виникає в обсязі тіла. Отримано рівняння, що описують кінетику вмісту вологи, тиску і температури у процесі впливу НВЧ-поля на продукт. Модель кінетики тепломасопереносу в процесі НВЧ-обробки дає змогу розраховувати зміну вмісту вологи, тиску і температури продукту. Це забезпечує проведення ефективного аналізу технологічних процесів із застосуванням електромагнітних полів з метою пошуку раціональних технологічних режимів і вдосконалення розрахунку обладнання.

Ключові слова: тепломасообмін, модель, рівняння, НВЧ, волога, тиск, температура.

Постанова проблеми. Процеси, які відбуваються під час обробки харчової сировини у полі НВЧ, достатньо складні для теоретичного аналізу, оскільки з точки зору термодинаміки необоротних процесів — це ряд пов'язаних явищ переносу маси, енергії, імпульсу в умовах неоднорідності і нелінійності гетерогенного середовища. Тому на практиці для отримання співвідношень, які використовуються в технологічних та інженерних розрахунках, використовуються кінетичні моделі, отримані при ряді спрощуючих положень. Однак відсутність системного підходу при отриманні таких моделей часто призводить до грубих помилок у складаних моделях і, як наслідок, поганої адекватності з експериментом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [1; 2] при отриманні рівнянь кінетики зміни вмісту вологи матеріалу робиться припущення про те, що основний масоперенос здійснюється за допомогою концентраційної дифузії вологи, а впливом термодифузії і фільтраційним перенесенням можна знехтувати. Внутрішній потік вологи в тілі описується рівнянням А.В. Ликова:

$$j_m = -\rho_0 a_m \nabla w - \rho_0 a_{mT} \nabla T - \rho_0 a_p c_p^a \nabla p, \quad (1)$$

де ρ_0 — об'ємна концентрація сухих речовин; ∇w — градієнт вологовмісту; ∇T — градієнт температури; ∇p — градієнт тиску; a_m — коефіцієнт дифузії вологи; a_{mT} — коефіцієнт термодифузії вологи; a_p — коефіцієнт конвективної фільтраційної дифузії; c_p^a — коефіцієнт ємності вологого повітря у пористому тілі.

Зроблене вище припущення визначає відкидання двох останніх членів у рівнянні (1). Постає закономірне запитання: як пояснити істотну інтенсифікацію масопереносу при НВЧ-сушінні в рамках зроблених припущень. Аналіз експериментальних даних про коефіцієнти дифузії, що входять у рівняння

(1), показує, що відношення $a_{mT} / a_m < 10^{-2} \dots 10^{-3}$, $a_p / a_m > 10 \dots 100$ [3]. Тому єдиним джерелом інтенсифікації масопереносу при НВЧ-обробці є градієнт надлишкового тиску пари, що виникає всередині тіла. Як відомо, при досить великій питомій потужності електромагнітного поля всередині тіла можливе його механічне пошкодження. Тому опис кінетики тиску в процесі НВЧ-обробки є актуальним науково-технічним завданням.

Метою статті є отримання фізично коректної та експериментально адекватної моделі кінетики тепломасобмінних процесів при обробці харчової сировини в полі НВЧ, що враховує зміну тиску пари всередині оброблюваного продукту.

Викладення основних результатів дослідження. У [4] викладена загальна концепція опису кінетики сполучених явищ перенесення колоїдних капілярно-пористих тіл, в тому числі для харчової сировини. В основу фізичної моделі покладено уявлення про гетероенергетичний стан вологи, описаний у термінах «вільна», «пов'язана» волога, та облік фізично значущих рушійних сил перенесення. Математична модель кінетики ґрунтується на рівнянні збереження і перенесення фізичної субстанції (маси, енергії, імпульсу):

$$R_V \frac{d\Psi}{d\tau} = -K \cdot \Delta\Psi - \nu \cdot \Psi + R_V \cdot I, \quad (1)$$

де $R_V = V/S$ — відношення об'єму тіла до його поверхні; Ψ — об'ємна концентрація фізичної субстанції; $\Delta\Psi$ — потенціал переносу фізичної субстанції; $K_{ij} = 1/\mathfrak{R}_{\Psi_j}^i$ — матриця кінетичних коефіцієнтів; ν — вектор швидкостей конвективного переносу; I — вектор внутрішніх джерел (стоків) субстанції.

$$\Delta\Psi_{ij} = \sum_j \frac{1}{\mathfrak{R}_{\Psi_j}^i} (\bar{\Psi}_j - \bar{\Psi}_{\infty j}), \quad (2)$$

де $\bar{\Psi}_{\infty j}$ — рівноважне значення субстанції при $\tau \rightarrow \infty$; $i, j = 1 \dots n$; n — кількість фізичних параметрів стану вологого тіла; $\mathfrak{R}_{\Psi_j}^i$ — коефіцієнт опору, який складається із суми опору зовнішнього і внутрішнього переносу, для потоку i -ої субстанції, викликаного j -ім потенціалом перенесення.

$$\mathfrak{R}_{\Psi_j}^i = \frac{R_V}{\lambda_{\Psi_j}^i} + \frac{1}{\alpha_{\Psi_j}^i}, \quad (3)$$

де $\lambda_{\Psi_j}^i$ — коефіцієнт потенціалу провідності; $\alpha_{\Psi_j}^i$ — коефіцієнт потенціалу обміну.

Використовуючи рівняння (1—3), отримаємо рівняння кінетики масопереносу при НВЧ-обробці. Фізичною субстанцією при масопереносі є вологовміст, тому $\Psi = \rho_0 w$. Джерело маси відсутнє $I_m = 0$. Дифузійним переносом під дією градієнта вологовмісту і температури нехтуємо. Конвективне перенесення вологи здійснюється під дією надлишкового тиску. Відповідно до

закону Дарсі, коефіцієнт опору фільтраційному потоку складає $\mathfrak{R} = \frac{R_V}{\rho_0 a_p c_p^a}$,

тому

$$R_V \rho_0 \frac{dw}{d\tau} = - \frac{\rho_0 a_p c_p^a}{R_V} \Delta p, \quad (4)$$

де Δp — надлишковий тиск пари у вологому тілі; $\Delta p = p - p_\infty$ (p — середній по об'єму тіла тиск, p_∞ — тиск у навколишньому середовищі).

Рівняння фільтраційного переносу вологи під дією градієнта тиску газу всередині тіла отримаємо на підставі рівнянь (1—3) з таких міркувань: фізичною субстанцією є маса вологого повітря в одиниці об'єму пористого тіла, що відповідає поточному тиску p :

$$\Psi = \rho_0 w_a = \rho_0 c_p^a p, \quad (5)$$

де w_a — зміст вологого повітря в порах тіла, яке наведено А.В. Ликовим стосовно співвідношення

$$dw_a = c_p^a dp, \quad (6)$$

де c_p^a — коефіцієнт ємності вологого повітря в пористому тілі.

Дифузійним перенесенням нехтуємо і вважаємо, що конвективний переніс описується законом Дарсі. Джерело маси в даному випадку обумовлено випаровуванням вологи в капілярах тіла під дією надвисокочастотного поля. Тому

$$I = \frac{Q_V}{r}, \quad (7)$$

де Q_V — питома потужність діелектричних втрат; r — прихована теплота пароутворення води.

$$Q_V = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2, \quad (8)$$

де ε_0 — електрична стала; f — частота НВЧ-поля; ε'' — уявна частина відносної діелектричної проникності; E — напруженість НВЧ-поля.

Відомо, що діелектрична проникність залежить від вмісту вологи. Вважаючи, що така залежність лінійна, запишемо:

$$\varepsilon'' = \chi w, \quad (9)$$

де χ — емпіричний коефіцієнт, який визначається на підставі експериментальних залежностей діелектричних характеристик від вмісту вологи продукту.

Розрахунок електричного поля у формулі (8) являє собою складне електродинамічне завдання, особливо в разі навантаженого багатомодового резонатора, який найчастіше використовується як НВЧ-пристрій для обробки матеріалу. Якщо навантаження резонатора перебуває в оптимальних межах, то питому потужність діелектричних втрат можна розрахувати за формулою:

$$Q_V = P_{CBЧ} / V, \quad (10)$$

де $P_{CBЧ}$ — потужність НВЧ-генератора; V — об'єм тіла.

Вважаючи, що початкове завантаження НВЧ-камери є оптимальним, на основі рівнянь (8—10) отримуємо:

$$Q_V = \frac{\chi w}{\varepsilon''(0)} \frac{P_{CBЧ}}{V}, \quad (11)$$

де $\varepsilon''(0)$ — уявна частина відносної діелектричної проникності в початковий момент часу НВЧ-обробки.

З урахуванням цього рівняння кінетики тиску набуває такого вигляду:

$$R_V \rho_0 c_p^a \frac{dp}{d\tau} = -\frac{\rho_0 a_p c_p^a}{R_V} \Delta p + R_V \frac{\chi w}{\varepsilon''(0)} \frac{P_{CBЧ}}{V}. \quad (12)$$

Введемо безрозмірні вологовміст і тиск $w^* = w / w_0$, $p^* = \Delta p / \Delta p_{\max}$, де w_0 — початковий вологовміст, Δp_{\max} — максимальний тиск всередині матеріалу.

Представимо систему кінетичних рівнянь у такому вигляді:

$$\frac{dw^*}{d\tau} = -Ra k_{22} p^*; \quad (13)$$

$$\frac{dp^*}{d\tau} = k_{21} w^* - k_{22} p^*, \quad (14)$$

де кінетичні коефіцієнти мають розмірність c^{-1} .

$$k_{21} = \frac{1}{Ra} \frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r}. \quad (15)$$

$$k_{22} = \frac{a_p}{R_V^2}, \quad (16)$$

де $Ra = c_p^a \Delta p_{\max} / w_0$ — критерій Рамзіна; Q_m — питома потужність на 1 кг сухої речовини; $Q_m = P_{CBЧ} / m_c$ (m_c — маса сухих речовин у продукті).

Рішення системи рівнянь (13)—(14) має такий вигляд:

$$w^*(\tau) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Ra-1}{\sqrt{1+Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}} \right) e^{-\beta_1 \tau} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{Ra-1}{\sqrt{1+Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}} \right) e^{-\beta_2 \tau} \quad (17)$$

$$p^*(\tau) = \frac{1}{2} \frac{k_{21}}{k_{22}} \frac{1}{\sqrt{1+Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}} (e^{-\beta_1 \tau} - e^{-\beta_2 \tau}), \quad (18)$$

де $\beta_1 = \frac{1}{2} k_{22} \left(1 - \sqrt{1+4Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}} \right)$, $\beta_2 = \frac{1}{2} k_{22} \left(1 + \sqrt{1+4Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}} \right)$.

Рівняння (17—18) описують кінетику зміни вмісту вологи і тиску в процесі НВЧ-обробки продукту. Отримаємо вираз для величини максимального надлишкового тиску парогазової суміші. Оскільки внутрішні джерела виникають миттєво при включенні НВЧ-поля, то такий максимум досягається при малих термінах часу. Тому, розкладаючи вираз $dp^*/d\tau = 0$ при $\tau \rightarrow 0$ і, обмежувшись лінійним членом, отримуємо час досягнення максимального тиску:

$$\tau_{kp} = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2} = \frac{1}{k_{22}}. \quad (19)$$

Максимальне значення тиску парогазової суміші при цьому становить:

$$\max(p^*) = \frac{1}{4} \frac{k_{21}}{k_{22}} \frac{\sqrt{1 + 4 \text{Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}}}{\sqrt{1 + \text{Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}}}. \quad (20)$$

З огляду на те, що для безрозмірного тиску $\max(p^*) = 1$, а також для виразу кінетичних коефіцієнтів k_{12} , k_{22} з рівняння (20) знаходимо зв'язок критерію Рамзіна і режимів НВЧ-обробки:

$$\text{Ra} = \frac{R_V^2}{4a_p} \frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r} \frac{\sqrt{\frac{a_p}{R_V^2} + 4 \frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r}}}{\sqrt{\frac{a_p}{R_V^2} + \frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r}}}. \quad (21)$$

Як видно з рівняння (21), максимальний тиск газу всередині тіла в процесі НВЧ-обробки зростає зі збільшенням НВЧ-потужності і характерних розмірів тіла та зменшується зі збільшенням коефіцієнта конвективно-фільтраційної дифузії. При відомих структурно-механічних характеристиках останній вираз дає змогу оцінювати гранично допустиму потужність НВЧ-установки, при якій зберігається механічна цілісність продукту.

Використовуючи рівняння (1—3), отримуємо рівняння кінетики температури при НВЧ-обробці харчової сировини. Переносною фізичною субстанцією є внутрішня енергія, тому $\Psi = \rho_0 c T$. Потужність внутрішнього потоку теплоти дорівнює $I_c = -r \rho_0 dw / d\tau$, потужність внутрішнього джерела тепла дорівнює $I_i = Q_V$, конвективним теплопереносом нехтуємо. З урахуванням цього отримуємо кінетичне рівняння:

$$R_V \rho_0 c \frac{dT}{d\tau} = -\frac{1}{\mathfrak{R}_T} \Delta T - R_V \rho_0 r \frac{dw}{d\tau} + R_V Q_V, \quad (22)$$

де

$$\mathfrak{R}_T = \frac{R_V}{\lambda_T} + \frac{1}{\alpha_T}, \quad (23)$$

де T — середня по об'єму тіла температура; c — наведена питома теплоємність; λ_T — коефіцієнт теплопровідності; α_T — коефіцієнт теплообміну.

Уведемо безрозмірну температуру $T^* = \Delta T / \Delta T_0 = (T - T_\infty) / (T_0 - T_\infty)$, де T_∞ — температура навколишнього середовища; T_0 — початкова температура тіла, та приведемо рівняння (22) до безрозмірного виду:

$$\frac{dT^*}{d\tau} = -k_{31}\theta - \text{Ko} \frac{dw^*}{d\tau} + \text{Ko} \frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r} w^*, \quad (24)$$

де $k_{31} = \frac{a}{R_V^2} \frac{\text{Bi}}{1 + \text{Bi}}$; $\text{Ko} = r(w_0 - w_\infty) / (c\Delta T_0)$ — критерій Коссовича.

Підставляючи в рівняння (24) отримані рішення для кінетики вологовмісту (17), отримаємо просте неоднорідне диференціальне рівняння, рішення якого має такий вигляд:

$$T^*(\tau) = (1 - C_1 - C_2)e^{-k_{31}\tau} + C_1e^{-\beta_1\tau} + C_2e^{-\beta_2\tau}, \quad (25)$$

де

$$C_1 = \frac{\text{Ko}}{2} \left(1 - \frac{\text{Ra} - 1}{\sqrt{1 + \text{Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}}} \right) \left(\frac{\frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r} + \beta_1}{k_{31} - \beta_1} \right);$$

$$C_2 = \frac{\text{Ko}}{2} \left(1 + \frac{\text{Ra} - 1}{\sqrt{1 + \text{Ra} \frac{k_{21}}{k_{22}}}} \right) \left(\frac{\frac{\chi}{\varepsilon''(0)} \frac{Q_m}{r} + \beta_2}{k_{31} - \beta_2} \right).$$

Висновки

Таким чином, запропонована модель кінетики тепломасопереносу в процесі НВЧ-обробки дає змогу розраховувати зміну вмісту вологи, тиску і температури продукту. Це забезпечує проведення ефективного аналізу технологічних процесів із застосуванням електромагнітних полів з метою пошуку раціональних технологічних режимів і вдосконалення обладнання.

Література

1. *Рогов И.А.* Сверхвысокочастный нагрев пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. — Москва : Агропромиздат, 1986. — 351 с.
2. *Беляев М.И.* Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов / М.И. Беляев, П.Л. Пахомов. — Харьков : ХИОП, 1991. — 160 с.
3. *Потапов В.А.* Экспериментальное определение движущих сил кинетики сушки / В.А. Потапов, Н.И. Погожих, Н.М. Цуркан // Труды Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». — Т. 2. — Москва : МГАУ. — 2002. — С. 118—121.
4. *Потапов В.А.* Научные основы анализа и управления кинетикой сушки пищевого сырья : дис. д-ра техн. наук: 05.18.12. — Харьков, 2007. — 348 с.