

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПІДВЕДЕННІ ЕНЕРГІЇ

Бурдо О.Г., д-р техн. наук, професор, Яровий І.І., аспірант
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса
Бандура В.М., канд. техн. наук, доцент
Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

У роботі розглянуто проблеми моделювання процесів сушіння при електромагнітному підведенні енергії. Враховуються бародифузійні процеси перенесення вологи з обсягу продукту. На основі теорії подібності система диференціальних рівнянь перетворена в рівняння в узагальнених змінних. Введено число енергетичної дії, яке враховує ефективність електромагнітного підведення енергії і бародифузійних процесів перенесення вологи з продукту.

The problem of modeling the drying processes at electromagnetic power supply has been considered in paper. Barodiffusion processes of moisture transport from product bulk are taken into account. On the basis of theory of similarity the system of differential equations has been transformed into generalized variables equations. The number of energy effect which takes account of the efficiency of electromagnetic power supply and moisture transport from the product.

Ключові слова: Сушіння, математичне моделювання, електромагнітне випромінювання, бародифузія.

Останні роки характеризуються бурхливим розвитком сушильної техніки з електромагнітними джерелами енергії (ЕДЕ). В той самий час удосконалення розробок ведеться на основі інженерної інтуїції. Рівень розуміння процесів взаємодії продукту й електромагнітних хвиль значно нижчий, ніж уявлення щодо електрофізичних явищ у генераторах електромагнітного випромінювання. Техніка електромагнітних генераторів випередила теорію тепломасопереносу в процесі сушіння при електромагнітному підведенні енергії. Пояснюється це тим, що самі генератори (особливо мікрохвильового діапазону) є елементами військової техніки, і їх вдосконалення проводилось на замовлення цієї галузі. Якщо врахувати, що прикладні проблеми навіть традиційного сушіння не доведені до загальноновизнаних інженерних методів проектування, то специфіка сушіння при електромагнітному підведенні енергії практично не вивчена. Проте успішне моделювання процесів сушіння з ЕДЕ може дати потужний імпульс для широкого впровадження перспективної техніки в харчові технології.

Фізична схема сушіння з ЕДЕ. Найбільший практичний інтерес становлять стрічкові сушильні установки, де продукт обробляється в тонкому шарі. Фізична схема сушіння наведена на рис. 1. Продукт рухається за допомогою стрічки із швидкістю w . Швидкість повітря відносно продукту складає v , а проміжок каналу його руху – δ_b .

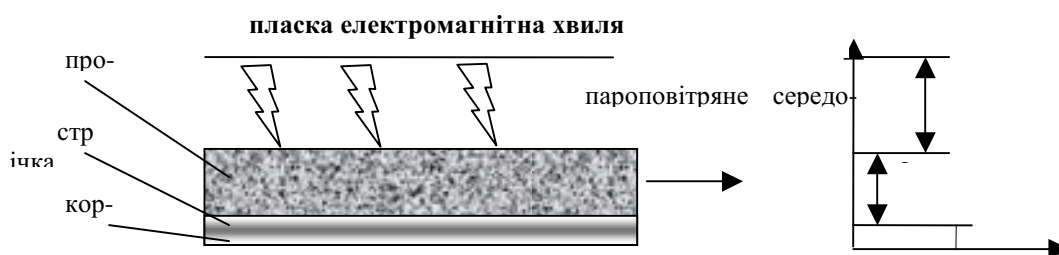


Рис. 1 – Схема процесу зневоднення при дії електромагнітного генератора

Оскільки повітряне середовище, яке прокачується через канал над продуктом, для електромагнітних хвиль практично прозоре, енергію випромінювання поглинає шар продукту, товщина якого $\delta_{пр}$. Тому можна вважати, що в шарі продукту діє об'ємне джерело, потужність якого N , а питома об'ємна щільність q_v . Стрічка транспортера, товщина якої $\delta_{л}$, може бути радіопрозорою, або електрично зв'язаною з корпусом, тобто поглинання енергії випромінювання в стрічці відсутнє. В той самий час вона взаємодіє за граничних умов IV роду з нагрітим продуктом. Поверхня продукту взаємодіє за граничних умов III

роду з потоком повітря. Повітря, приймаючи вологу продукту, зволожується і нагрівається, якщо його температура нижча, ніж температура продукту. Особливістю електромагнітного підведення енергії є те, що максимальні значення і температури, і вологовмісту розташовані усередині продукту. Ця відмінність від традиційних (конвективних і кондуктивних) способів підведення енергії дозволяє істотно знизити витрати енергії на зневоднення [1]. Рівень енергетичних витрат залежить від узгодженості параметрів електромагнітного поля, структури продукту, швидкості його переміщення і параметрів повітряного середовища. Ключовий вплив має схема ініціації потоку вологи з продукту при максимальних значеннях рушійної сили процесу вологопереносу.

Рушійна сила і кінетика процесів дифузійно-фільтраційного вологопереносу. Сучасні уявлення про механізм зневоднення матеріалів у процесі сушіння базуються на наукових основах тепломасопереносу при фазових переходах [2-5] і на теорії П.О. Ребіндера про форми зв'язку вологи з колоїдними і капілярно-пористими матеріалами. Зовнішні дії різної фізичної природи (енергетичні, концентраційні, гідродинамічні, електромагнітні і тому подібне) формують у продукті поля температур, тисків, вологовмісту. Комбінований вплив відповідних рушійних сил визначає розвиток гідродинамічних, теплових і масообмінних процесів. Теорія сушіння, основи якої закладені О.В. Ликовим [2], визначає потік вологи усередині пористого матеріалу таким виразом:

$$j = -(D\rho_c \nabla U + D\delta\rho_c \nabla t + K_p \nabla P) \quad (1)$$

де $\nabla U, \nabla t, \nabla P$ – градієнти, відповідно, вологовмісту, температури і тиску; δ – відносний коефіцієнт термодифузії (кг/кгК); K_p – коефіцієнт фільтраційного (молярного) перенесення (кг/м·с·Па).

Специфіка різноманітних завдань сушіння пояснюється молекулярним натіканням газу по мікрокапілярах (ефузія), дифузією ковзання (потік пароподібної вологи, яка переноситься за допомогою теплового ковзання), циркуляцією газу в макропорах (природна конвекція). Важко зрозуміти термін «концентраційна дифузія» стосовно потоку вологи усередині твердого капілярно-пористого тіла. Якщо існує такий процес, то він повинен підкорятися рівнянню Фіка і характеризуватися відповідним коефіцієнтом дифузії. В той самий час, коефіцієнти дифузії води безпосередньо в твердих водонерозчинних структурах не визначались, ясно, що їх величини нікчемно малі для помітного впливу на кінетику сушіння. Очевидно, поняттям «концентраційна дифузія» підміняється результат складного гідравлічного перерозподілу вологи усередині тіла в системі паралельних капілярів, викликаного процесом пароутворення в макрокапілярах і перекачуванням рідини в мікрокапіляри.

Система О.В.Ликова справедлива для будь-якого виду вологотеплопереносу, проте має дуже серйозне обмеження: феноменологічні коефіцієнти K_j мають бути постійними. Тому, загальна модель реалізується тільки для крайових обмежених випадків [1], вона зручна лише для якісного аналізу механізму процесу сушіння і не знайшла практичного застосування.

Система рівнянь О.В. Ликова у ряді випадків доповнювалась, наприклад П.П. Луциком, співвідношенням, що враховує деформації і механічну напругу твердих капілярно-пористих тіл [5].

Зусилля більшості вчених у сфері сушіння були спрямовані на експериментальне моделювання процесів, розробку методів розрахунку кінетики сушіння. Визначилась тенденція все більшого обмеження в моделях видів об'єктів і продуктів. Виправданням було підвищення точності моделі. Нарешті, стали використовувати регресійні моделі, що описують масиви експериментальних даних. Точність таких моделей визначалася погрішностями експериментальних даних та можливостями математичного апарату і виявлялась цілком прийнятною для інженерних завдань. Проте, ці моделі справедливі тільки для умов дослідів і для дослідженого об'єкта, тобто не поширюються на клас навіть подібних завдань, не можуть бути використані для постановки завдань прогнозування і оптимізації навіть дослідженого апарату.

Таким чином, теорія сушіння не може ефективно використовувати величезний за обсягом експериментальний матеріал. Загальні моделі неточні, а точні регресійні моделі не можуть дати ніякої нової інформації.

Видається, що проблеми, які виникли при описі процесу сушіння пояснюються тим, що всі автори, прибічники феноменологічного підходу, розглядають сушіння як деякий одиночний процес із постійними коефіцієнтами перенесення і формують моделі, виходячи з цих припущень.

У роботі [1] висувається гіпотеза, що сушіння – це результат дії за принципом суперпозиції, щонайменше, трьох процесів, що ілюструється рис. 2.

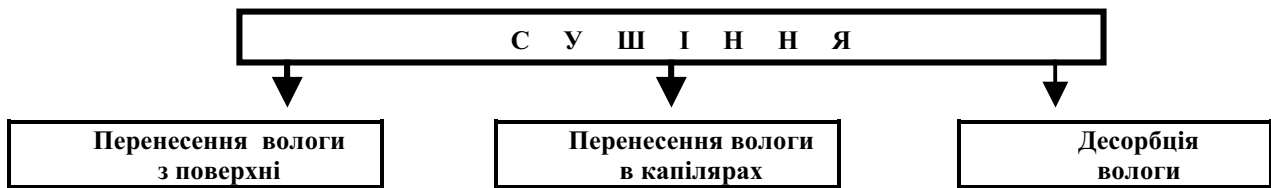


Рис. 2 – Структурна схема процесів при сушінні

Відповідно до такого підходу перебудовуються граф тепловологопереносу і система рівнянь О.В. Ликова. Розглядаються самостійно: поверхнева волога U_P , капілярна волога U_K і зв'язана волога абсорбції U_A (рис. 3).

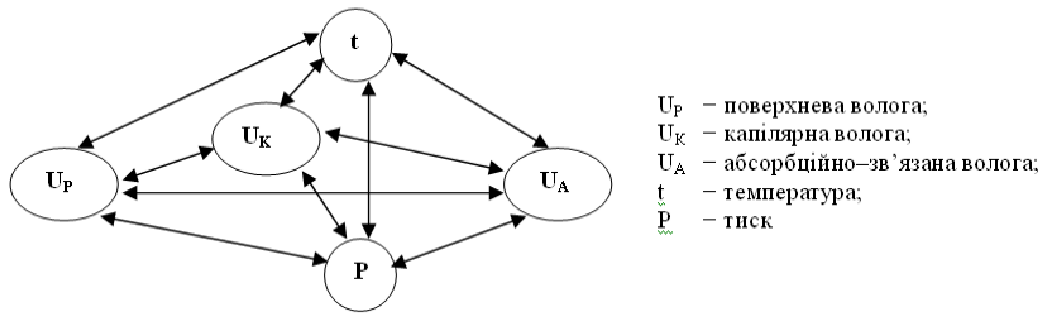


Рис. 3 – Граф запропонованої схеми сушіння

Відповідно до рис. 3 перетвориться і система рівнянь О.В. Ликова:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U_P}{\partial \tau} &= K_{11} \nabla^2 U_P + K_{12} \nabla^2 U_K + K_{13} \nabla^2 U_A + K_{14} \nabla^2 t + K_{15} \nabla^2 P \\ \frac{\partial U_K}{\partial \tau} &= K_{21} \nabla^2 U_P + K_{22} \nabla^2 U_K + K_{23} \nabla^2 U_A + K_{24} \nabla^2 t + K_{25} \nabla^2 P \\ \frac{\partial U_A}{\partial \tau} &= K_{31} \nabla^2 U_P + K_{32} \nabla^2 U_K + K_{33} \nabla^2 U_A + K_{34} \nabla^2 t + K_{35} \nabla^2 P \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} &= K_{41} \nabla^2 U_P + K_{42} \nabla^2 U_K + K_{43} \nabla^2 U_A + K_{44} \nabla^2 t + K_{45} \nabla^2 P \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} &= K_{51} \nabla^2 U_P + K_{52} \nabla^2 U_K + K_{53} \nabla^2 U_A + K_{54} \nabla^2 t + K_{55} \nabla^2 P \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Система рівнянь (2) складніша, ніж система О.В. Ликова, але вона дозволяє обґрунтувати висунуту гіпотезу про суперпозицію дії при сушінні декількох процесів. Кожен з цих процесів характеризується своїм значенням рушійної сили і кінетичним коефіцієнтом швидкості процесу. В межах свого процесу ці параметри можуть прийматися однаковими, а для різних процесів вони істотно відрізняються. Кожен з трьох процесів підкоряється своїм законам перенесення і реалізується за рахунок різних механізмів (таблиця.1).

Таблиця 1 – Характеристика основних процесів при сушінні

Процес	Механізм процесу	Рушійна сила процесу	Кінетичний коефіцієнт
Випарювання вологи з поверхні	Конвективна дифузія	$a_K P_{\Pi} - P_B$	β_K
Випарювання вологи усередині капілярів та пір	Конвективна дифузія в обмежених умовах	$a_C P_{\Pi} - P_B$	β_C
Десорбція вологи	Конвективна дифузія	$a_D P_{\Pi} - P_B$	β_D

Висунена гіпотеза [1] не суперечить фундаментальним уявленням фізики вологого капілярно-пористого тіла. За загально визнаною схемою форм зв'язку вологи П.О. Ребіндера видалення вологи різ-

них форм зв'язку – це різні процеси зі своїми коефіцієнтами перенесення, зі своїм потенціалом і рушійною силою (таблиця 1). Спроба корекції рушійної сили за допомогою показника активності води a_i відома у світовій практиці [5].

Математична модель сушіння при електромагнітному підведенні енергії. Відповідно до фізичної схеми (рис. 1) і представлень (рис. 3) формулюється математична модель. У зоні дії електромагнітного випромінювання рівняння енергії набере вигляду:

$$c \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} t) + r \gamma \rho_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} + N_E \quad (3)$$

у співвідношенні (3) прийняті позначення: c – теплоємність продукту; ρ – щільність сухої частини продукту; r – теплота фазового переходу води в пару; γ – частка води, яка перейшла в пару; N_E – об'ємна щільність внутрішніх джерел теплоти (відповідає поглинанню проникного електромагнітного випромінювання).

У цій самій сфері кінетика вологопереносу визначається відповідними рушійними силами. Як правило, інтерес становлять процеси видалення поверхневої і капілярної вологи:

$$\frac{\partial U_P}{\partial \tau} = \operatorname{div} (D_P \operatorname{grad} U_P) \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_K}{\partial \tau} = \operatorname{div} (D_T \operatorname{grad} T + D_B \operatorname{grad} P_K) \quad (5)$$

де, D_P , D_T , D_B – коефіцієнти, відповідно, конвективної дифузії, термодифузії і бародифузії.

Стосовно стрічкової сушарки (рис. 1) рівняння (3.5) з відповідними рівняннями зв'язку слід записати для всіх n зон активної довжини сушарної камери L_A . У кожній зоні діє своє джерело електромагнітної енергії – N_i .

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_i &= L_A; \quad i = 1, 2, 3 \dots n \\ \sum_{i=1}^n N_i &= N_E \quad i = 1, 2, 3, \dots n \end{aligned} \quad (6)$$

В межах однієї зони запишемо відповідні залежності при наступних допущеннях:

1. У початковий момент часу температура продукту (t_P), стінки (t_{CT}) і всіх конструктивних елементів установки є однаковою і дорівнює температурі довкілля (t_{OC}).

2. Фізичні параметри продукту в межах кожної зони постійні і приймаються в балансових моделях як середні значення (t_P – середня температура продукту в аналізованій зоні, U_P – його вологовміст).

3. Витрата повітря (L_B), продукту (G_P) і потужність випромінювання (N) в межах кожної зони постійні.

4. Швидкість руху стрічки (w) постійна, тобто питоме навантаження на поверхню стрічки в межах кожної зони постійне.

5. Даний процес є квазістаціонарним.

6. Теплопровідністю в шарі продукту вздовж осі X можна знехтувати.

7. На поверхні продукту величина гідродинамічного пограничного шару дорівнює товщині пограничного теплового і дифузійного шарів.

При сформульованих допущеннях на верхній поверхні сушарки ($y = y_B$):

$$\begin{aligned} \text{при } \tau = 0, & \quad t_{CT} = t_{OC}, & \quad N = 0 \\ \text{при } \tau > 0, & \quad \text{ГУ II роду,} & \quad N = N_i = \text{const;} \end{aligned} \quad (7)$$

Для повітряного каналу, $y_P < y \leq y_B$

Для потоку повітря:

$$\begin{aligned} \text{при } \tau = 0, & \quad t_B = t_{OC}, \\ \text{при } \tau > 0, & \end{aligned}$$

$$Q_B = L_B (i_0 - i_1) = \alpha_B F_i (t_P - t_B); \quad F_i = l_i b_i \quad (8)$$

За рахунок потоку вологи з продукту проходить його зволоження:

$$L_B (X_0 - X_1) = J \quad (9)$$

Гідродинаміку повітряного потоку відображає рівняння Нав'є-Стокса в одновимірному наближенні:

$$\rho_B v_B \frac{\partial v_B}{\partial x} = \rho_B g - \frac{\partial P_B}{\partial x} + \mu_B \frac{\partial^2 v_B}{\partial x^2} \quad (10)$$

У співвідношеннях (8, 9, 10): α_B – коефіцієнт тепловіддачі від продукту до потоку повітря, i_0, i_1 – ентальпії повітря на вході і виході зони, F_1 – площа поверхні продукту, b_1 – його ширина, l_1 – його довжина в межах зони, J – потік вологи з продукту, v – відносна (продукту) швидкість повітря, P_B – тиск повітря, g – гравітаційна константа, ρ_B – щільність повітря, μ_B – динамічний коефіцієнт в'язкості повітря, Q_B – теплообмін між продуктом і повітрям.

Основні процеси відбуваються в об'ємі продукту $u_L < y \leq u_P$.

при $\tau = 0$, $t_P = t_{OC}$,

при $\tau > 0$,

Для шару продукту рівняння Фур'є - Кирхгофа:

$$\frac{\partial t_P}{\partial \tau} = a_P \left(\frac{\partial^2 t_P}{\partial x^2} + \frac{\partial t_P}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

при ГУ III роду на межі $y = u_P$:

$$-\lambda_{.P} \left(\frac{\partial t_P}{\partial y} \right) - \alpha_B (t_P - t_B) = 0 \quad (12)$$

Енергетичний баланс у шарі продукту враховує нагрів сухої частини (Q_C) і вологи (Q_U), переведення в пару частини (γ) рідини (Q_J), теплообмін з повітрям (Q_B), стрічкою транспортера (Q_L) і поглинання проникного електромагнітного випромінювання (N_E).

$$Q_C + Q_U + Q_J + Q_B + Q_L + N = 0 \quad (13)$$

або

$$G_C c_{P_C} (\Delta t_{P_i}) + G_U c_{P_U} (\Delta t_{P_i}) + r \gamma G_U + L_B (\Delta i_B) + Q_L + N_E b \delta_P l_i = 0 \quad (14)$$

Потік вологи з продукту складається з конвективного (J_K), термодифузійного (J_T) і бародифузійного (J_B) потоків при відповідних коефіцієнтах масовіддачі ($\beta_K, \beta_T, \beta_B$) поверхонь фазового контакту (F_i, F_{Ki}, F_{Bi}) і різниці парціальних тисків ($\Delta P_P, \Delta P_T, \Delta P_B$).

$$J = J_K + J_T + J_B = \beta_K F_i (\Delta P_P) + \beta_T F_{Ki} (\Delta P_T) + \beta_B F_{Bi} (\Delta P_B) \quad (15)$$

На межі продукту і стрічки транспортера ($y = u_L$) відбувається теплообмін за граничних умов IV роду:

$$\lambda_{.P} \left(\frac{\partial t_P}{\partial y} \right) + \lambda_{.L} \left(\frac{\partial t_L}{\partial y} \right) = 0 \quad (16)$$

Аналогічно при контакті стрічки з корпусом ($y=0$):

$$\lambda_{.Ke} \left(\frac{\partial t_K}{\partial y} \right) + \lambda_{.L} \left(\frac{\partial t_L}{\partial y} \right) = 0 \quad (17)$$

Оскільки цей теплообмін проходить за наявності контактної термічної опору (R_{TK}), то використовується значення ефективного коефіцієнта теплопровідності:

$$\lambda_{.Ke} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_L} + R_{TK}} \quad (18)$$

За наявності шару теплової ізоляції:

$$\frac{\partial t_I}{\partial \tau} = a_I \left(\frac{\partial^2 t_I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_I}{\partial y^2} \right), \tau > 0, \quad (19)$$

умови однозначності

при $\tau = 0$, $t_I = t_{OC}$,

Вплив довкілля:

Теплообмін між ізолюваною поверхнею сушарки і довкіллям проходить при ГУ III роду:

$$\lambda_{.I} \left(\frac{\partial t_I}{\partial y} \right) + \alpha_C (t_{OC} - t_I) = 0 \quad (20)$$

Замикають систему рівнянь залежності теплофізичних властивостей продукту, повітря, стрічки та ізоляції від температури

$$\lambda_{\Pi} = \lambda(t_{\Pi}, U_{\Pi}); \quad \lambda_B = \lambda(t_B, X_B); \quad \lambda_L = \lambda(t_L); \quad \lambda_H = \lambda(t_H) \quad (21)$$

$$a_{\Pi} = a(t_{\Pi}, U_{\Pi}); \quad a_B = a(t_B, X_B); \quad a_L = a(t_L); \quad a_H = a(t_H) \quad (22)$$

$$\rho_{\Pi} = \rho(t_{\Pi}, U_{\Pi}); \quad \rho_B = \rho(t_B, X_B); \quad \rho_L = \rho(t_L); \quad \mu_B = \mu(t_B, X_B); \quad D = D(t_{\Pi}) \quad (23)$$

Основні проблеми з практичною реалізацією математичної моделі (7...23) пов'язані з виразами (10) і (15). Це зумовлює необхідність залучення методів теорії подібності і формування адекватної моделі в узагальнених числах подібності.

Гідродинамічну ситуацію в повітряному каналі сушарки можна представити класичним числом Рейнольдса: $Re = v l_i \rho \mu^{-1}$.

Для оцінки впливу потужності електромагнітного випромінювання на кінетику сушіння в [1] запропоновано число енергетичної дії, яке показує співвідношення поглиненої продуктом енергії N_E до тієї енергії, яка потрібна для переведення в пару всієї вологи, що видаляється:

$$Bu = N_E (rY G_U)^{-1} \quad (24)$$

Число Bu в наближенні до 1 характеризує «ідеальне» теплове сушіння, де вся підведена до продукту енергія витрачається тільки на переведення вологи в пару. В той самий час, ефективна організація бародифузійних процесів дозволяє частину вологи видаляти у вигляді туману [1]. Таким чином, число Bu може служити мірою бародифузійного перенесення вологи.

Розрахунок коефіцієнтів масовіддачі β проводиться на основі рівнянь в узагальнених змінних, як залежність числа Шервуда від чисел Рейнольдса і Шмідта. Тоді для умов сушіння в нерухомому шарі можна рекомендувати рівняння в узагальнених змінних:

$$Sh = A Re^n Sc^m Bu^k \quad (25)$$

Для стрічкових сушарок перспективнішим може стати узагальнення із застосуванням масообмінного числа Стантона:

$$St_m \equiv \frac{\beta}{w} = A Re^h Sc^p Bu^q \quad (26)$$

Константи в рівняннях (25, 26) визначаються при обробці масивів експериментальних даних.

Числа Шервуда і Стантона являють собою дві різні безрозмірні форми коефіцієнта масовіддачі. Кожна з цих форм має свої переваги. Число Шервуда не містить режимних параметрів, але до його складу входять характерний розмір системи і коефіцієнт дифузії.

Число Стантона безпосередньо пов'язане з дифузійним опором, воно не залежить від уявлення про пристінний пограничний шар як зону дії молекулярного механізму масопереносу. Видається, що число St більш характерне при аналізі кінетики процесів сушіння з бародифузійним перенесенням вологи.

Запропонований підхід дозволить розраховувати кінетику сушіння при відомих режимних параметрах і структурних характеристиках продукту, обґрунтовувати й оптимізувати процеси сушіння при електромагнітному підведенні енергії до продукту.

Література

1. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. – Одесса: Полиграф, 2010. – 368 с.
2. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
4. Акулич П.В. Термогидродинамические процессы в технике сушки / Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, 2002. – 268 с.
5. Луцик П.П. Массопроводность деформируемого в процессе сушки твердого пористого тела // Промышленная теплотехника. 1987. – Т.9, – №5. – С. 29-34.
6. Лонцин М., Мерсон Р. Основные процессы пищевых производств: пер. с англ. – М. 1983. – 384 с.
7. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях / Инженерно-физический журнал. – Т.78, – №1.-2005.-С. 88-93.