

УДК 631.365.2

© Р.В. Кірчук, к.т.н

Луцький національний технічний університет

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті представлено аналіз сучасних підходів щодо теоретичного опису та моделювання процесів сушіння дисперсних рослинних матеріалів. Запропоновано та проаналізовано моделі сушіння поодиноких частинок, елементарного шару та товстого шару матеріалу. Обґрунтовано передумови та вказано на припущення, що є необхідними при моделюванні процесів сушіння насіння сільськогосподарських культур.

ЧАСТИНКА, ВОЛОГОВМІСТ, ВОЛОГІСТЬ, ТЕМПЕРАТУРА, СУШИЛЬНИЙ АГЕНТ, ЕЛЕМЕНТАРНИЙ ШАР, РУХОМИЙ ШАР МАТЕРІАЛУ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

Постановка проблеми. Кінетичний розрахунок процесу сушіння є важливою складовою науково-технічного обґрунтування параметрів технологічного процесу виробництва продукції рослинництва. Математичні моделі, створені на основі аналізу перебігу процесу сушіння, дають можливість встановити і оптимізувати параметри сушарок та режимів їх роботи. Тому дослідження методів моделювання і опису сушіння дисперсних матеріалів та створення систем інтенсифікації процесу залишається актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для інтенсифікації процесів сушіння та збільшення продуктивності роботи пунктів післязбиральної обробки насінневого матеріалу, досить часто, пропонується створення та використання допоміжних механізмів, які впливають на перебіг процесу сушіння матеріалу [1-4].

Окрім того, для пошуку шляхів оптимізації методів сушіння, багато уваги приділено теоретичному аналізу процесу. Класичний підхід до опису процесів тепло-масопереносу відображено у роботах Ликова, Гінзбурга, Крішера та ін. [5-8]. Узагальнення існуючих сучасних методів теоретичного обґрунтування сушіння капілярно-пористих колоїдних тіл відображено у монографії Б.Гайвася [9].

На даний час, для кінетичного розрахунку процесу сушіння дисперсних матеріалів розрізняють методи, які можна розділити на три групи: 1) емпіричні, 2) напівемпіричні та 3) аналітичні [10,11].

Емпіричний підхід базуються на проведенні експерименту, що реалізує модель типу «чорний ящик». Разом із плануванням

експерименту та регресійними методами обробітку результатів він дозволяє отримати інформацію про процес сушіння, яка обмежується рамками та умовами експерименту. Недоліком такого підходу є складність переносу результатів лабораторних досліджень на виробничі об'єкти. Окрім того, ігнорується «фізика» процесу сушіння матеріалів.

Серед різноманіття напівемпіричних методів опису процесу сушіння можна виділити наступні групи: методи, що ґрунтуються на апроксимації експериментальних даних; методи диференціювання рівнянь тепло-масопровідності за допомогою дослідних функціональних залежностей типу $Rb = f \bar{u}$, $\bar{u} = f \bar{t}$ (тут Rb - критерій Ребіндера, \bar{u} - середнє значення вологовмісту, \bar{t} - середнє значення температури сушильного агенту). Прикладом напівемпіричного методу аналізу процесу сушіння є відоме рівняння Ликова:

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = K \bar{u} - u_p,$$

де K - коефіцієнт сушіння; u_p - рівноважний вологовміст.

До аналітичних методів розрахунку кінетики сушіння можна віднести методи, які на мікрокінетичному рівні, у першому періоді сушіння, ґрунтуються на рівняннях тепло-масовіддачі, а у другому періоді – на рівняннях масо-теплопровідності для одиничних частинок[12]:

$$\begin{aligned} \partial u / \partial \tau &= \text{div} \left[k_{u,t} \text{grad} u + \delta_i u, t \text{ grad} t \right], \\ c_{u,t} \rho_o \partial t / \partial \tau &= \text{div} \left[\lambda_{u,t} \text{grad} t \right] + \varepsilon^* r^* \rho_o \partial u / \partial \tau, \end{aligned}$$

де δ_i - відносний коефіцієнт термовологопровідності; c - теплоємність; ρ_o - густина сухого матеріалу; ε^* - локальний коефіцієнт фазового перетворення; λ - коефіцієнт теплопровідності; r^* - сума теплоти пароутворення та адсорбції; τ - час.

Для вирішення подібного класу задач часто застосовуються числові методи розв'язку рівнянь. Окрім того, важливим завданням є окреслити коло допущень та передумов для моделювання процесів сушіння дисперсних матеріалів.

Мета дослідження – проаналізувати сучасний стан наукових теоретичних положень щодо опису процесів сушіння дрібнодисперсних капілярно-пористих колоїдних тіл для обґрунтування припущень та вибору способу моделювання при розробці засобів та методів післязбирального обробітку насінневого матеріалу.

Результати дослідження. Найбільш складною проблемою розрахунку процесу сушіння є визначення кінетичних законностей. Метою кінетичного розрахунку при конструюванні сушильних установок є визначення розмірів безперервно діючих сушарок, що забезпечують задану продуктивність і режиму процесу, який забезпечує мінімальні енерговитрати і не погіршує якість матеріалу, що піддається сушінню.

Враховуючи значну термічну чутливість насіннєвого матеріалу, що обмежує застосування високих температур нагріву матеріалу в процесі сушіння, виникає необхідність досить точного розрахунку кінетики нагрівання матеріалу для визначення режимних параметрів, що необхідні для оптимізації процесу в кожній конкретній установці при заданих (вибраних) схемах руху потоків матеріалу і сушильного агенту. При цьому, збереження якості продукту в процесі сушіння залежить не тільки від абсолютної величини температури нагріву, а і від швидкості нагріву і зневоднення [7,13].

Розглянемо сушіння одиночних часинок. Швидкість сушіння і нагрівання твердого тіла пов'язані основним рівнянням кінетики сушіння О.Ликова, яке справедливе для будь якого способу сушіння:

$$\bar{q}_n = C_o + C_e \bar{u} \rho_o \frac{V}{F} \frac{d\bar{\theta}}{d\tau} + r_o \frac{V}{F} \rho_o \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (1)$$

де \bar{q}_n - щільність (густина) потоку підведення теплоти, Вт/м²;

C_o , ρ_o - питома теплоємність і густина абсолютно сухого матеріалу, відповідно Дж/кг °С та кг/м³;

C_e - питома теплоємність води, Дж/кг °С;

r_o - питома теплота пароутворення, Дж/кг;

V , F - об'єм та площа поверхні тіла, м³ та м²;

$\bar{\theta}$ - середньооб'ємна температура матеріалу, °С;

\bar{u} - вологовміст матеріалу, кг/кг;

τ - час, с.

Для конвективного способу сушіння тепловий потік до матеріалу визначається рівнянням Ньютона:

$$\bar{q}_n = \alpha t_c - \bar{\theta}_n, \quad (2)$$

де α - коефіцієнт теплообміну, який враховує усі складові теплопереносу (зовнішнього), Вт/м²°С;

$t_c, \bar{\theta}_n$ - температура сушильного агенту та поверхні матеріалу, °С.

Враховуючи незначні розміри частинок насіннєвого матеріалу (еквівалентний діаметр 1,3...2,1·10⁻³ м) можна прийняти нагрівання поодиноких частинок безградієнтним і визначити швидкість нагріву

методами регулярного теплового режиму [6]. Тобто прийняти, що $\theta_n = \bar{\theta}$.

Для визначення швидкості сушіння при низькотемпературних режимах ($t_c = 45...55^\circ C$ та температурі матеріалу $15...40^\circ C$) можна використовувати аналітичні розв'язки диференціального рівняння масопровідності (коли прийняти, що еквівалентний коефіцієнт дифузії або масопровідності постійний за усім об'ємом тіла), що для сферичної частинки має вигляд [14]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right). \quad (3)$$

При граничних умовах третього роду (конвективний масообмін поверхні кулі з середовищем) і початкових значеннях $u|_{\tau=0} = u$ $r = u_0$ розв'язок рівняння (3) для зміни середньооб'ємного вологовмісту отримано у вигляді:

$$\frac{\bar{u} \tau - u_p}{u_0 - u_p} = \sum_{j=1}^{\infty} B_j e^{-\mu_j^2 \frac{a_m}{R^2} \tau}, \quad B_j = \frac{6 \sin \mu_j - \mu_j \cos \mu_j}{\mu_j^3 \mu_j - \sin \mu_j \cos \mu_j}, \quad (4)$$

де μ_j - корені характеристичного рівняння $tg \mu = \frac{\mu}{1 - Bi_m}$;

a_m - коефіцієнт масопровідності;

$Bi_m = \frac{\beta}{a_m} R$ - масообмінний критерій Біо.

Теорія регулярного режиму, розвинена на прикладі теплових процесів [14], приводить до висновку, що з початком регулярного режиму темп зміни вологовмісту всередині тіла практично перестає залежати від його розподілу і стає однаковим залежним лише від a_m, R через значення характеристичного числа задачі μ , величину якого можна отримати розкладом в ряд характеристичного рівняння у вигляді [6]:

$$\mu_1^2 = 3Bi_m = 3 \frac{\beta}{a_m} R. \quad (5)$$

Тоді рівняння (4) набуде вигляду:

$$\bar{u} \tau - u_p = u_0 - u_p \cdot B_1 \cdot e^{-\mu_1^2 \frac{a_m}{R^2} \tau}. \quad (6)$$

Швидкість сушіння визначатиметься диференціальним рівнянням (6):

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \tau = u_0 - u_p B_1 \mu_1^2 \frac{a_m}{R^2} \cdot e^{-\mu_1^2 \frac{a_m}{R^2} \tau} . \quad (7)$$

Виключивши величину B_1 підстановкою з рівняння (6) в рівняння (7) матимемо:

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \tau = \mu_1^2 \frac{a_m}{R^2} \bar{u} \tau - u_p , \quad (8)$$

або з врахуванням (5):

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \tau = \frac{3\beta}{R} \bar{u} \tau - u_p . \quad (9)$$

Коефіцієнт масообміну β можна визначити з критерію Нуссельта:

$$\beta = Nu_m \frac{a_m}{R} . \quad (10)$$

Величини (число) масообмінного критерію Нуссельта, як відомо з [14], визначається для поодиноких часток:

$$Nu_m = 0,9 Re^{0,5} \cdot Pr_m^{0,33} , \quad (11)$$

де $Re = \frac{R}{\nu} v$ - критерій Рейнольдса; $Pr_m = \frac{\nu}{D_v}$ - критерій Прандля; ν - кінематична в'язкість середовища; v - швидкість переміщення середовища; D_v - коефіцієнт дифузії.

Залежність коефіцієнта масо провідності від температури для насінневих матеріалів за літературними даними [7], може бути узагальнена лінійною залежністю: $a_m \theta = 0,00253\theta - 0,012 \cdot 10^{-8}$.

Залежність a_m u від вологості апроксимована лінійною залежністю (при $u = 0,15 \dots 0,35$): $a_m u = 3,2u - 0,4 \cdot 10^{-8}$, m^2/c .

Залежність коефіцієнта масопровідності насінневого (зернового) матеріалу за літературними даними [7] може апроксимуватись залежністю:

$$a_m \bar{\theta}, \bar{u} = A_0 a_1 \theta - b_1 a_2 \bar{u} - b_2 , \quad (12)$$

де A_0, a_1, a_2, b_1, b_2 - сталі коефіцієнти.

З врахуванням (10)-(12) рівняння (9) перепишеться у вигляді:

$$-\frac{du}{d\tau} \tau = K_c u \tau - u_p , \quad (13)$$

$$\text{де } K_c = 2,7 \frac{\nu^{0,5} \cdot a_m \theta, u}{R^{1,5} \cdot \nu^{0,17} \cdot D \theta, t_c^{0,33}}.$$

Відповідно до [2] рівняння (13) є модифікованим рівнянням масопередачі по твердій фазі для одиначної частинки і його можна використовувати для визначення кінетики сушіння насінневого (зернового) матеріалу.

Розв'язок рівняння (13) за початкової умови: $\tau = 0; u = u_0$ матиме вигляд:

$$u \tau = u_p + u_0 - u_p e^{-K_c \cdot \tau}. \quad (14)$$

Цей розв'язок визначає зміну вологовмісту частинки матеріалу в часі. При цьому, рівноважна вологість матеріалу, як відомо, залежить від параметрів середовища (для насіння трав залежність u, t, φ подана таблицею в роботі [15]).

Розглянемо сушіння матеріалу в елементарному нерухомому шарі. Сушіння дисперсних матеріалів, які мають значну теплосприймаючу поверхню контакту з сушильним агентом в шарі, призводить до суттєвої зміни температури сушильного агенту в напрямку його руху крізь шар зерна. При цьому, параметри матеріалу, а саме: температура і, відповідно, вологовміст в кожній точці шару будуть визначатись параметрами сушильного агента (t_c, d, ν), а розв'язок (13) отримано при сталих параметрах середовища.

В зв'язку з цим, для практичних розрахунків процесу сушіння і параметрів сушильної установки, як показує практика [7,11,14], доцільно використовувати коефіцієнт сушіння K, t, ν . Величина коефіцієнта визначається параметрами сушильного агента, що отримані безпосередньо з експериментів.

Іншою особливістю процесу сушіння насінневого матеріалу є те, що частинки дисперсного матеріалу, які мають різні розміри і форму, висушуються з різною швидкістю в різних періодах сушіння і мають різні температурні криві. Тому при усередненні кінетичних залежностей різних частинок в шарі «середні кінетичні криві» можуть бути описані експоненціальними (геометрично гладкими) кривими [2]. За даними роботи [15] сушіння насіння трав в шарі відбувається в періоді падаючої швидкості. Тобто, кінетика сушіння насіння в шарі може бути описана рівняннями О.Ликова (для падаючої швидкості сушіння).

Швидкість сушіння насіння трав отримано диференціюванням рівняння (14).

$$-\frac{du}{d\tau} = u_0 - u_p \cdot t, d \cdot e^{-K_c \cdot \tau} \cdot K_c. \quad (15)$$

Встановити параметри кінетики сушіння і нагрівання матеріалу в елементарному щільному нерухомому шарі можна з наступних міркувань. Підставляючи вирази (2), (13) в рівняння (1) матимемо:

$$m_0 C u \frac{d\theta}{d\tau} - m_0 \cdot r_0 \cdot K_c \cdot \Delta u_0 \cdot e^{-K_c \tau} = \alpha F (t - \theta), \quad (16)$$

де $m_0 = V_0 \rho_0$; $\Delta u_0 = u_0 - u_p$; $C u = C_0 + C_g u$.

Позначимо:

$$T_1 = \frac{m_0 C u}{\alpha F}; K_u = \frac{m_0 r_0 K_c \Delta u_0}{\alpha F}.$$

Рівняння (16) набуде вигляду:

$$T_1 \frac{d\theta}{d\tau} + \theta = K_u e^{-K_c \tau} + t, \quad (17)$$

За умовами незмінної в часі температури сушильного агента, що дорівнює температурі на вході в шар $t = t_1$ розв'язок неоднорідного диференціального рівняння отримаємо за початкових умов $\theta|_{\tau=0} = \theta_0$ у вигляді:

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{\tau}{T_1}} + t_1 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_1}} \right) + \frac{K_u}{T_1 \left(\frac{1}{T_1} + K_c \right)} \left(e^{-K_c \tau} - e^{-\frac{\tau}{T_1}} \right). \quad (18)$$

Рівняння (18) описує кінетику нагрівання (зміну температури) вологого матеріалу в процесі сушіння в нерухомому шарі при постійній температурі середовища.

Однак, при фільтрації сушильного агента крізь шар матеріалу з фіксованими витратами, сушильний агент буде віддавати частину теплоти. Його температура буде зменшуватись в часі. У цьому випадку, для визначення кінетики нагрівання вологого матеріалу рівняння теплового балансу (16) запишеться у вигляді:

$$m_0 C u \frac{d\theta}{d\tau} - m_0 \cdot r_0 \cdot K_c \cdot \Delta u_0 \cdot e^{-K_c \tau} = C_{Tv} C_p (t_1 - t_2), \quad (19)$$

де C_{Tv} - масові витрати сушильного агента, кг/с; t_1, t_2 - температура сушильного агента на вході і виході шару матеріалу, $^{\circ}\text{C}$.

Права частина рівняння (19) визначає кількість теплоти, яку сушильний агент витрачає при фільтрації крізь шар і яка витрачається на нагрівання матеріалу і випаровування вологи.

Невідома величина t_2 визначається з рівняння теплообміну:

$$C_{Tv}C_p t_1 - t_2 = \alpha F (0,5t_1 + 0,5t_2 - \theta) . \quad (20)$$

В рівнянні (20) прийнято, що температура сушильного агента за висотою шару змінюється за лінійним законом, що цілком виправдано, враховуючи незначну товщину шару ($h = 3 \div 5 \cdot 10^{-3}$ м).

$$t_2 = n \cdot t_1 + m\theta , \quad (21)$$

$$\text{де } n = \frac{C_{Tv}C_p - 0,5\alpha F}{C_vC_p + 0,5\alpha F} ; m = \frac{\alpha F}{C_{Tv}C_p + 0,5\alpha F} .$$

Підставляючи (21) в (19) після перетворень матимемо:

$$\frac{d\theta}{d\tau} \tau + K_T\theta = C_0t_1 + K'_n e^{-K_c\tau} , \quad (22)$$

$$\text{де } K_T = m \frac{C_{Tv}C_p}{m_0C u} ; C_0 = 1 - n \frac{C_{Tv}C_p}{m_0C u} ; K'_n = \frac{m_0r_0K_c\Delta u_0}{m_0C u} .$$

Розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (22) за початкових умов $\theta|_{\tau=0} = \theta_0$ отримано у вигляді:

$$\theta \tau = \theta_0 e^{-K_T\tau} + \frac{1-n}{m} (1 - e^{-K_T\tau}) + \frac{K'_n}{K_T - K_c} (e^{-K_c\tau} - e^{-K_T\tau}) . \quad (23)$$

Рівняння (18) та (23) дають можливість визначити час нагрівання матеріалу до критичної температури. При наявності залежності $\alpha \nu, t$ можливим є визначення раціональних гідродинамічних і температурних режимів, що забезпечують максимальну інтенсивність попереднього нагріву матеріалу.

Зміну вихідної температури (температури відпрацьованого сушильного агента) в часі визначимо з рівняння (21) підстановкою замість θ її функціональної залежності в часі (23):

$$t_2 = n \cdot t_1 + m \cdot \theta \tau , \quad (24)$$

$$t_2 = n \cdot t_1 + m \left[\theta_0 e^{-K_T\tau} + \frac{1-n}{m} (1 - e^{-K_T\tau}) + \frac{K'_n}{K_T - K_c} (e^{-K_c\tau} - e^{-K_T\tau}) \right] . \quad (25)$$

Розглянемо сушіння і нагрівання дисперсного матеріалу в рухомому шарі. Складність теплових, масообмінних і гідродинамічних процесів, що одночасно відбуваються в сушарах безперервної дії, тобто в рухомому шарі дисперсного матеріалу при взаємодії із сушильним

агентом (в режимі прямої течії, протитечії або перехресному русі) зумовлює необхідність прийняття ряду спрощуючих припущень. І в першу чергу, таким припущенням є розгляд процесів тепло- і масо переносу, які відбуваються в стаціонарному (уставленому) режимі, при якому, у випадку нерухомого шару матеріалу, його параметри і параметри сушильного агента в кожній точці простору незмінні в часі розглядаються явно. Таке припущення [3,4] дозволяє поділити нестационарний процес сушіння у дві стадії: перехідний (пуск і вихід на заданий режим) і усталений робочий режим при заданих параметрах руху матеріалу і сушильного агента. Відповідно до такої методики досліджень аналізу процесу сушіння в стаціонарному режимі похідні за часом (рівняння 7-9) прирівнюються до нуля.

Для визначення перехідних процесів похідні за координатою в напрямку руху матеріалу та сушильного агента визначаються із залежностей стаціонарного розподілу параметрів матеріалу і сушильного агента $\theta x, u x, t x, \alpha x$ отриманих аналітично або експериментально.

Висновки. Аналіз сучасних підходів щодо опису теоретичних положень процесу сушіння сільськогосподарських дисперсних матеріалів вказує на те, що слід поетапно виконувати розрахунок процесу зневоднення одиної частинки (насінини), шару матеріалу, який перебуває як у нерухомому так і рухомому стані. При створенні математичних моделей процесів зневоднення та нагріву матеріалу слід приймати наступні припущення:

- усі види теплопередачі враховуються коефіцієнтом теплообміну α , величина якого усереднюється між початковими і кінцевими значеннями («мокрый» і «сухий» теплообмін);
- теплофізичні характеристики матеріалу і сушильного агента в процесі незмінні і дорівнюють середнім значенням;
- коефіцієнт сушіння залежить лише від параметрів сушильного агента і в розрахунках апроксимується лінійними залежностями;
- нагрів часток матеріалу є безградієнтним.

Література.

1. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів. Монографія. – Луцьк: ЛДТУ, 2002.–165 с.
2. Котов Б.И. Кинетика низкотемпературной сушки трав / Б.И. Котов, В.А. Яроцкий // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Киев: 1984, вып.60. – с.66 – 69.
3. Котов Б.И. Врахування розподіленості параметрів при моделюванні динамічних режимів сушарок сільськогосподарських

матеріалів / Б.І. Котов, С. П. Степаненко, В.О. Швидя // Сільськогосподарські машини. Луцьк: 2016, вип.34. с. 74 – 80.

4. Котов Б.І. Тепло і масообмін при сушінні і охолодженні зернового матеріалу у щільному рухомому шарі / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, О.Д. Курганський // Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2016, №4(96) с. 64 –67.

5. Лыков А.В. Теория сушки. М. «Энергия», 1968. – 472 с.

6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967 – 600с.

7. Гинзбург А.С. Проектирование установок для сушки пищевых продуктов. Москва: Агропромиздат, 1985. – 336 с.

8. Кришер О. Научные основы техники сушки. М.: Иностранная литература, 1961. 540 с.

9. Гайвась Б. Математичне моделювання конвективного сушіння матеріалів з урахуванням механотермодифузійних процесів // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології . 2010, вип.12, 9-37с.

10. Рудобашта С.П. Масоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия,1980.248с.

11. Фролов В.Ф. Моделирование и сушка дисперсных материалов. Л.: Химия, 1987. – 208 с.

12. Рудобашта С.П. Кинетический расчет процесса конвективной сушки дисперсных материалов //Тепломассообмен – ММФ – 2000. IV Минский международный форум по тепломассообмену 22-26 мая 2000 г. Т.9. Тепломассообмен в процессах сушки. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова АН Р. Беларусь. 2000. С. 41-48.

13. Любошиц И.Л. Сушка дисперсных термочувствительных материалов / И.Л. Любошиц, А.С. Слободкин, И.Ф. Пикус. – Минск: Наука и техника, 1969. – 214 с.

14. Романков П.Г. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой). – Ленинград: «Химия»,1990 – 384 с.

15. Егоров П.Е. Исследование процесса сушки семян трав в плотном слое. Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: ВИМ, 1975. – 21 с.

Рецензент д.т.н. Дідух В.Ф.