

УДК 631.365

© Р.В. Кірчук, к.т.н.

Луцький національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДИСПЕРСНОГО НАСІННЕВОГО МАТЕРІАЛУ В РУХОМОМУ ШАРІ

У статті проведено аналіз тепло-масообмінних процесів сушіння дисперсних сільськогосподарських матеріалів у сушарці з спіралеподібною сушильною камерою. Запропоновано математичну модель та послідовність розрахунку параметрів процесу сушіння рухомого шару насіння.

ДИСПЕРСНИЙ МАТЕРІАЛ, КІНЕТИКА СУШІННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ

Постановка проблеми. В системі післязбирального обробітку насінневого матеріалу важливе місце займає операція сушіння, яка значною мірою впливає на посівні і врожайні властивості насіння.

Кінетичний аналіз та розрахунок процесу сушіння дисперсних сільськогосподарських матеріалів є складною задачею, що дозволяє обґрунтування режимні параметрів процесу сушіння в процесі виробництва продукції рослинництва. Математичні моделі, створені на основі такого аналізу, дають можливість оптимізувати методи і засоби виконання даної технологічної операції. Тому теоретичні дослідження та моделювання і опис сушіння дисперсних матеріалів залишається актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для інтенсифікації процесів сушіння досить часто науковці формують моделі тепло-масообмінних процесів, дослідження яких та підбір початкових даних дає змогу формувати розрахункові параметри режимів сушіння [1-3]. Теорія оптимізації методів сушіння вимагає широкого використання теоретичному аналізу процесу. Сучасний підхід до опису процесів тепло-масопереносу відображено у роботах відомих роботах [4-6]. Узагальнення існуючих сучасних методів теоретичного обґрунтування сушіння капіляропористих колоїдних тіл відображено у монографіях [7,8].

Мета дослідження полягає у встановленні залежностей та побудови алгоритму розрахунку процесу сушіння дисперсних сільськогосподарських матеріалів шляхом теоретичного аналізу тепло-масобмінних процесів капіро-пористих колоїдних тіл.

Результати дослідження. 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, протитоку або перехресного русі) зумовлює необхідність прийняття ряду спрощуючих припущень. І в першу чергу, таким припущенням є розгляд процесів тепло- і масо переносу, які відбуваються в стаціонарному (установленому) режимі, при якому у випадку нерухомого шару матеріалу його параметри і параметри сушильного агента в кожній точці простору незмінні в часі розглядати явно. Таке припущення дозволяє поділити нестаціонарний процес сушіння у дві стадії: перехідний (пуск і вихід на заданий режим) і установлений робочий режим при заданих параметрах руху матеріалу і сушильного агента.

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.

При створенні математичних моделей процесів зневоднення та нагріву матеріалу приймаються наступні припущення:

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

Загальний вигляд сушарки і процес, який розглядається, представлено на рис.1 [9], а схема процесу переміщення матеріалу і сушильного агента на рис.2.

Відповідно до наведених схем, процес сушіння відбувається за тепловою схемою протитоку, так як температура матеріалу збільшується в напрямку вивантаження матеріалу, а температура сушильного агента зменшується в напрямку від вивантаження до подачі матеріалу.

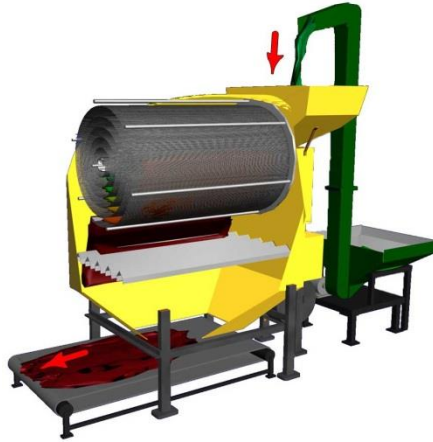


Рис.1 – Ротаційна сушарка сипкого насіннєвого матеріалу

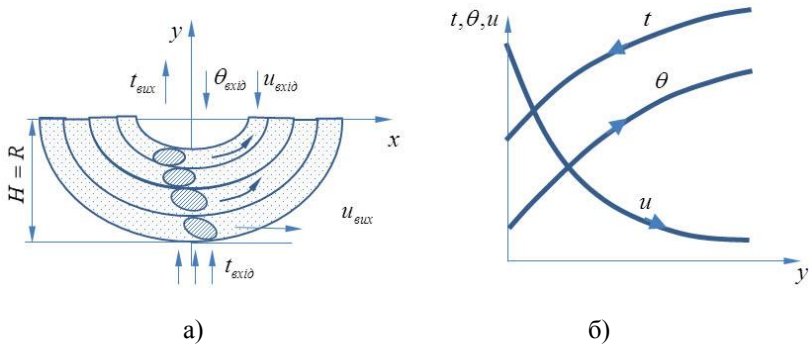


Рис.2 – Узагальнена схема процесів зміни параметрів матеріалу (а) та теплоносія (б)

Процес сушіння матеріалу на спіральній поверхні, що обертається, в рухомому шарі представимо схемою моделі багатосекційного (за кількістю витків спіралі) каскадного апарату з перехресним рухом сушильного агента і матеріалу (рис. 1). Математичний опис процесів тепло- і масо переносу складаємо мікрокінетичним методом [10,11], сутність якого полягає у рішенні прийнятої моделі (схеми) взаємодії потоків повного перемішування твердої фази (дисперсного матеріалу в межах однієї секції) і повного витиснення газової фази (сушильного агента), а також кінетичних закономірностей для групи часток, що

характеризуються середнім значення за об'ємом значенням температури і вологості).

Специфіка сушіння дисперсного матеріалу при перехресному переміщенні із сушильним агентом (як математичний аналог нерухомого шару [12]) полягає у тому, що швидкість нагріву та сушіння матеріалу залежить тільки від параметрів сушильного агенту в місці контакту з матеріалом на певній відстані від місця вводу.

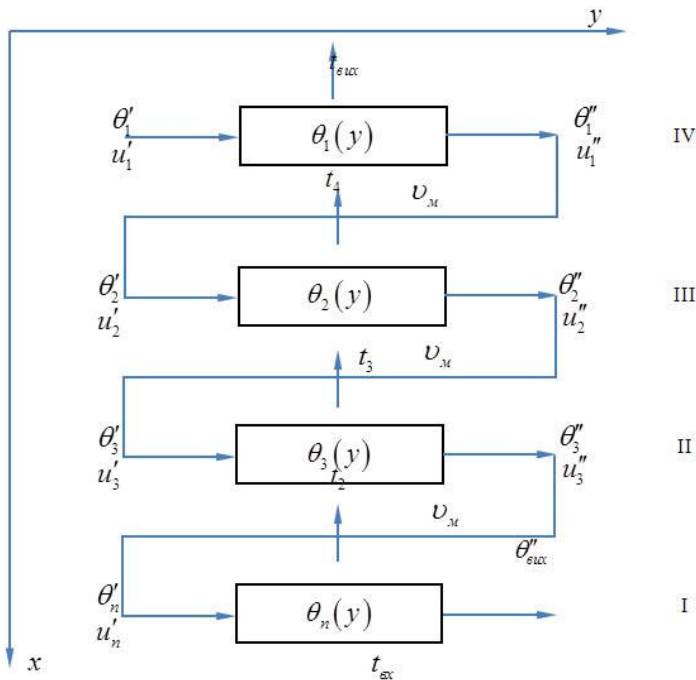


Рис.3 – Розрахункові зони «каскадів» і позначення в рухомому шарі матеріалу запропонованої моделі

Відповідно до схеми (рис.3) $\theta_1'' = \theta_2'$, $\theta_2'' = \theta_3'$, $\theta_3'' = \theta_n'$, $u_1'' = u_2'$, $u_2'' = u_3'$, $u_3'' = u_n'$. Тобто температура і вологовміст матеріалу на вході з одного каскаду дорівнює цим параметрам на вході наступного каскаду.

За такої схеми організації сушильного процесу, враховуючі можливість перемішування матеріалу між вітками спірального барабана можна прийняти температуру матеріалу постійною за висотою шару, яка дорівнює середньооб'ємній величині. Тоді, враховуючі переміщення матеріалу за довжиною секції «каскаду»

(напрямок осі OY) величина температури і вологовмісту матеріалу буде розподіленою в напрямку руху. Температура сушильного агента на вході шару кожної секції «каскаду» буде також змінюватись в напрямку руху матеріалу і в напрямку руху сушильного агента від останньої «секції» до місця виходу відпрацьованого сушильного агента (вісь OX).

Взаємозв'язок потоків маси і теплоти між каскадами-елементами рухомого шару матеріалу розраховується за принципом, коли параметри матеріалу і сушильного агента на вході кожного «каскаду» дорівнюють параметрам на вході попереднього «каскаду». Для опису процесу в елементарному рухомому шарі, який фільтрується сушильним агентом з масовими витратами G_c , використаємо систему потрійних рівностей, що отримана методами термодинаміки незворотних процесів [13] і використовується для розрахунку чарункової моделі [14].

$$G_c C_p (t_1 - t_2) = m_{oi} \left[C_M(u_i) \frac{d\bar{\theta}}{d\tau} - r_0(\theta) \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right] = \alpha F_T \Delta T, \quad (1)$$

$$G_c (d_1 - d_2) = m_0 \frac{d\bar{u}}{d\tau} = \beta_p F_M \Delta d, \quad (2)$$

де G_c - масові витрати сушильного агента, кг/с;

m_{oi} - маса абсолютно сухого матеріалу в елементарному шарі, кг;

$C_M(u)$ - теплоємність вологого матеріалу, Дж/кг $^{\circ}\text{C}$;

β_p - коефіцієнт масовіддачі, $1/\text{m}^2\text{c}$;

t_1, t_2, d_1, d_2 - температура ($^{\circ}\text{C}$) і вологовміст (кг/кг) сушильного агента на вході і виході шару матеріалу;

F_T, F_M - поверхня теплообміну і масообміну, m^2 ;

$\Delta T = \bar{t} - \bar{\theta}$; $\Delta d = d'' - d$;

d'' - вологовміст сушильного агента на поверхні матеріалу.

Для виключення з рівнянь (1) та (2) невідомих величин t_2 і d_2 скористаємось поняттям коефіцієнтів охолодження і зволоження сушильного агента [14]:

$$\eta_T = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - \bar{\theta}}, \quad (3)$$

$$\eta_d = \frac{d_1 - d_2}{d_1 - d''}. \quad (4)$$

Враховуючи, що температура матеріалу прийнята постійною за висотою шару (рухомого), величина температурного напору ΔT визначається як середньологарифмічне значення, тобто

$$\Delta T = \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{t_1 - \theta}{t_2 - \theta}}. \quad (5)$$

Підставляючи (5) в третю сатину рівності (1) отримаємо:

$$G_c C_p (t_1 - t_2) = \alpha F_T \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{t_1 - \theta}{t_2 - \theta}}. \quad (6)$$

З рівняння (6) з врахуванням (3) матимемо:

$$\eta_T = 1 - e^{-\frac{\alpha F_T}{G_c C_p}}. \quad (7)$$

З врахуванням того, що $t_1 - t_2 = \eta_T (t_1 - \bar{\theta})$ рівняння переписеться у вигляді:

$$G_c C_p \eta_T (t_1 - \bar{\theta}) = m_{oi} \left[C_M(u_i) \frac{d\bar{\theta}}{d\tau} - r_0(\theta) \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right] \quad (8)$$

Прийнявши припущення, що швидкість нагріву матеріалу пропорційна швидкості зневоднення і використовуючи визначення критерію Ребіндера $Re = \frac{C_M(u) d\bar{\theta}}{r(\theta) d\bar{u}}$, переписеться рівняння (8) у вигляді:

$$G_c C_p \eta_T (t_1 - \bar{\theta}) = C'_M \frac{d\bar{\theta}}{d\tau} m_0, \quad (9)$$

$$C'_M = \left(1 + \frac{1}{Rb} \right) C_M(u)$$

де

Оскільки швидкість переміщення матеріалу в напрямку OY дорівнює $\mathcal{G}_M = \frac{dy}{d\tau}$, рівняння (9) набуває вигляду:

$$\mathcal{G}_M m_o C'_M \frac{d\theta}{dy} = G_c C_p \eta_T (t_{ex} - \theta), \quad (10)$$

де t_{ex} - температура сушильного агенту на вході в шар (в загальному вигляді може бути функцією координати y).

Температура сушильного агента на вході в шар матеріалу може бути визначена із співвідношення (3):

$$t_2 = t_{ex} - \eta_T (t_{ex} - \theta(y)), \quad (11)$$

або розв'язком рівняння теплового балансу для сушильного агента, що фільтрується крізь шар рухомого матеріалу з постійною за висотою шару температурою.

Рівняння теплового балансу, що описує зміну температури сушильного агента на елементі висоти шару dx , запишеться у вигляді:

$$C_p \cdot S \cdot \rho_c \cdot dx dt = \frac{\alpha F}{H} (\bar{\theta} - t) dx dt, \quad (12)$$

де S - площа перетину шару матеріалу, крізь яку фільтрується сушильний агент (m^2) з густиною ρ_c ($кг/м^3$);

F - площа поверхні матеріалу, m^2 ;

H - висота шару матеріалу в каскаді, м.

Беручи до уваги, що масові витрати сушильного агенту визначаються співвідношенням $G_c = v_c \cdot S \cdot \rho_c$, а швидкість сушильного агента $v_c = dx/d\tau$, замість рівняння (3.36) можна записати вираз

$$\frac{dt(x)}{dx} = \frac{\alpha \cdot \sigma \cdot m_M}{G_c C_p H} (\bar{\theta} - t(x)), \quad (13)$$

де $\sigma = F/m_M$ - питома поверхня матеріалу, $m^2/кг$.

Розв'язок рівняння (13) за граничних умов: $x = 0 \Big|_{t=t_{ex}}$ матиме вигляд:

$$t(x) = t_{ex} + (t_{ex} - \bar{\theta}) e^{-K'x}, \quad (14)$$

де $K'_c = \frac{\alpha \sigma m_M}{G_c C_p H}$, $m_M = m_0(1+u)$.

Температура сушильного агенту на виході шару $t_{вих}$ визначається рівнянням (3.38) за умови $x = H$:

$$t_{вих} = t_{ex} + (t_{ex} - \bar{\theta}) e^{-K'_i}, \quad (15)$$

де $K'_i = \frac{\alpha_i \sigma m_{0i}(1+u_i)}{G_{ci} C_p}$.

Рівняння кінетики сушіння матеріалу в елементарному рухомому шарі (з урахуванням того, що вологовміст матеріалу за висотою шару є постійним) при перехресному русі сушильного агенту запишеться у вигляді:

$$v_{Mi} \frac{d\bar{u}_i}{dy} = K_c (u_p - \bar{u}), \quad (16)$$

де v_{Mi} - швидкість переміщення матеріалу в i -му шарі, м/с;

K_c - описаний вище коефіцієнт сушіння, 1/с.

Зміна вологовмісту за координатою в напрямку руху запишеться як:

$$u(y) = u_p(t, d) + (u_{ex} - u_p(t, d)) e^{-\frac{K_c}{v_M} y}, \quad (17)$$

де u_{ex} - вологовміст матеріалу на вході в елемент каскаду, кг/кг с.р.

Розв'язок рівняння (17) за умови $y=0 \Big|_{\theta=\theta'=\theta_{ex}}$ ($\theta_{ex} = \theta'$ - температура матеріалу на вході в каскад або зону сушіння) матиме вигляд:

$$u(y) = t_{ex} - (t_{ex} - \theta'_i) e^{-K_i y}, \quad (18)$$

де $K_i = \frac{G_c C_p \eta}{v_M m_{0i} C'_{Mi}}$.

Таким чином при безперервному за напрямками (перехресний рух матеріалу і сушильного агента) руху потоків в межах одного каскаду (зони сушіння) будуть справедливі наступні розрахункові формули:

$$\theta_i(y) = t_{\text{exi}}(y) - (t_{\text{exi}}(y) - \theta'_i) e^{-K_i y}, \quad (19)$$

$$t_{\text{exi}+1} = t_{\text{вixi}} = t_{\text{exi}} + (t_{\text{exi}} - \theta'_i(y)) e^{-K_i}, \quad (20)$$

$$u_i(y) = u_p + (u'_i - u_p) e^{-\frac{K_c(t_{i+1}(y))}{v_{\text{Mi}}}}. \quad (21)$$

Початкові умови до рівнянь (19) та (21), тобто значення параметрів u_i , θ_i на вході в каскад (i -ту зону сушіння) визначається з рівнянь теплового балансу з врахуванням витрат теплоти на фазові переходи (випаровування вологи).

$$C_p G_c (t_{i-1} - t_i) = C_M (\bar{u}_i) G_0 (1 + \bar{u}_i) (\theta_i - \theta'_i) + G_0 r_0 (u_i - u'_i). \quad (22)$$

Використовуючи позначення

$$R_1 = \frac{G_0 r_0 \left(1 + \frac{R b_i}{1 + u_i}\right)}{G_c C_p}, \quad (23)$$

$$R_2 = \frac{G_c C_p}{(G_0 + G_0 (u_i + 1) R b_i) r_0} \quad (24)$$

з рівняння (22) матимемо:

$$u_i = u_{i+1} - R_2 (t_{i+1} - t_i), \quad (25)$$

$$\theta_i = \theta_{i+1} - R_1 (t_{i+1} - t_i). \quad (26)$$

Температура відпрацьованого сушильного агенту на вході шару t_{i+1} можна визначити тільки за затратами теплоти, що передається теплообміном до поверхні матеріалу в об'ємі каскадного елемента.

Рівняння нагріву матеріалу і повітря в об'ємі шару матеріалу можна описати з врахуванням умов теплообміну:

$$\left. \begin{aligned} G_0 C'_M \frac{d\theta}{dx} &= \alpha_i F_i (t - \theta), \\ G_c C_p \frac{dt}{dx} &= -\alpha_i F_i (t - \theta) \end{aligned} \right\}. \quad (27)$$

Розв'язок системи (27) за початкових умов $\tau = 0 \Big|_{t=t_1, \theta=\theta_1}$

відносно t запишеться у вигляді:

$$t(x) = t_1 + \frac{K_1}{K}(t_1 - \theta_1)e^{-Kx}, \quad (28)$$

$$\text{де } K_1 = \frac{\alpha F}{G_c C_p}, \quad K = \alpha F \left(\frac{1}{G_c C_p} + \frac{1}{G_0 C'_M} \right).$$

Температура сушильного агенту на виході i -го шару матеріалу, за умови $x = h_i$ (h_i - висота шару), складе:

$$t_i = t_{i-1} + \frac{K_1}{K}(t_{i-1} - \theta_1)e^{-K_i/h_i}. \quad (29)$$

Висновки. У результаті теоретичного аналізу процесу сушіння дисперсних сільськогосподарських матеріалів у рухомому шарі отримано математичні залежності та встановлено послідовність розрахунку параметрів процесу тепло-масообміну. Запропонована математична модель може бути використана для встановлення режимних параметрів роботи сушарок із спіралеподібною формою сушильної камери.

Література

1. Анискин В.И. Моделирование процесса низкотемпературной сушки зерна в слое с помощью ЭВМ / В.И. Анискин, Г.С. Окунь, И.И. Веруман // Труды ВИМ – Москва, 1987 т. 115 – С. 42-47.
2. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков — М.: Энергия, 1968 – 472 с.
3. Гапонюк О. І. Активне вентилявання та сушіння зерна / О.І. Гапонюк, М.В. Остапчук, Г.М. Станкевич, І. І. Гапонюк. - Одеса: ВМВ, 2014. - 325 с.
4. Котов Б.І. Моделювання режимів сушіння дисперсних матеріалів в безперевних сушарках колонкового типу / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, А.В. Спірін // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. - 2016. - № 6. - С. 69-75. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalc_2016_6_10
5. Котов Б.І. Математичне моделювання процесу сушіння рослинних матеріалів в барабанній сушарці при змінній швидкості переміщення матеріалу / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, А.В. Спірін // Інженерія природокористування. - 2017. - № 2. - С. 19-23. - Режим доступу:

http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2017_2_6

6. Котов Б. І. Електротепловий спосіб акумуляції енергії для активного вентилявання сільськогосподарської продукції / Б. І. Котов, А. В. Спірін, Р. А. Калініченко // Техніка, енергетика, транспорт АПК. - 2016. - № 1. - С. 81-83. – Режим доступу:

http://nbuv.gov.ua/UJRN/tetapk_2016_1_19

7. Гайвась Б.І. Основні підходи в математичному моделюванні процесів сушіння капілярно-пористих та дисперсних матеріалів // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2017. – Вип. 25. – С. 27-50.

8. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів. Монографія / В.Ф.Дідух. – Луцьк, вид. ЛДТУ, 2002. – 165с.

9. Забродоцька Л. Ю. Обґрунтування технологічного процесу та параметрів сушарки вороху насіння трав : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Л. Ю. Забродоцька; Кіровоград. нац. техн. ун-т.-Кіровоград, 2012. - 22 с.

10. Романков П. Г. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой) / П. Г. Романков, В.Ф. Фролов. - Ленинград: Химия, 1990.

11. Романков П. Г. Массообменные процессы химической технологии (системы с твердой фазой)/ П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская, В.Ф. Фролов. Ленинград: Химия, 1975. - 336 с.

12. Фролов, В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В.Ф. Фролов. – Л. : Химия, 1987. – 208 с.

13. Загоруйко В.А. Исследование гидротермических равновесных состояний пищевого сырья и процессов его переработки с паровоздушной средой : автореф. дис докт. техн. наук: / В.А.Загоруйко; Киев.1974.-30с.

14. Загоруйко В.А. Моделирование и метод расчета кинетики процесса сушки зернистых материалов/ В.А. Загоруйко, Ю.И. Кривошеев, А.В. Соколовская - Промышленная теплотехника.– К.: 1980, №2.-С.81-89